

DIE TAKTILE FEINSENSIBILITÄT
NATÜRLICHER ZÄHNE

Eine klinisch-experimentelle Untersuchung

INAUGURAL-DISSERTATION
zur Erlangung des Doktorgrades
der Hohen Medizinischen Fakultät
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
zu Bonn

vorgelegt von: KARL-HEINZ UTZ
aus Solingen
Bonn 1982

Angefertigt mit Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der Universität Bonn

1. Gutachter: Professor Dr. L. Hupfauf
2. Gutachter: Priv. Doz. Dr. B. Koeck

Tag der mündlichen Prüfung: 7. 1. 1982

Aus der Prothetischen Abteilung der Universitäts-Klinik
und Poliklinik für Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten Bonn
(Direktor: Prof. Dr. L. Hupfauf)

Druck: R. Schwarzbald, Geltorfstr. 52, Witterschlick

A b s t r a c t

UTZ, KARL-HEINZ:

THE TACTILE SUBTLE SENSIBILITY OF NATURAL TEETH - A CLINICAL EXPERIMENTAL RESEARCH

In two experimental series the tactile sensibility of natural antagonistic teeth is measured.

With 109 persons tested, by means of oxide grains of aluminium equably distributed in yoghurt and diversely big, an absolute threshold value of 15 μm is found out. Male persons tested discover somewhat smaler foreign bodies than female ones. Most of those being tested can improve the threshold value through practice, yet not reduce at will.

In a second experimental series the tactile sensibility is researched with the help of copper foils which were differently big. The absolute tactile threshold values of more than 70 tested pairs of front, pre-molar, and molar teeth each amount to 10 μm each, those of canine tooth pairs to 20 μm (median).

From the calculation of a 50-per-cent sensibility follows for the front teeth 29 μm , for the canine teeth 63 μm , and for the pre-molars and molars 17 μm each. Fluctuations dependent upon sexes are not to be ascertained.

Both experimental series test various tactile sensibilities. They detect no statistically safe dependence of the tactile capability of the persons tested upon age, time of day, conduct of teeth, gliding off movement between centric position and maximum intercuspitation as well as the dental supply of the teeth.

Für meine Eltern

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	7
2. Problemstellung	7
3. Ziele der Arbeit	11
4. Anatomisch-histologische und physiologische Vorbemerkungen	
4.1. Struktur, Gefäßversorgung, Nervenverlauf und mechano-elektrisches Transformations-system des Parodonts	12
4.2. Verteilung der Rezeptoren im Parodont	14
4.3. Physiologische Bewegungsmechanismen des Parodonts	15
4.4. Mechano-elektrisches Transformations-system der Haut	16
4.5. Sinnesphysiologie des Parodonts	16
4.6. Bedeutung der Rezeptoren im Parodont, in der Kaumuskulatur und im Kiefergelenk beim Tastvorgang	21
4.7. Allgemeine subjektive Sinnesphysiologie	23
5. Eigene Untersuchungen	
5.1. Auswahl und zahnärztlicher Befund der Versuchspersonengruppe	24
5.2. Untersuchung der Feinsensibilität des Parodonts mit Hilfe von Fremdkörpern in der Nahrung (Versuch 1)	26
5.2.1. Auswahl der Prüfkörper	26
5.2.2. Vorversuche	28
5.2.3. Endgültiger Versuchsaufbau	30
5.2.4. Kritik am Versuchsaufbau	33
5.3. Untersuchung der Feinsensibilität des Parodonts mit Hilfe von Metallfolien zwischen antagonistischen Zahnpaaren (Versuch 2)	
5.3.1. Auswahl des Prüfmateri als	34
5.3.2. Versuchsaufbau bei den Folienversuchen	35
5.3.3. Kritik am Versuchsaufbau	42
6. Statistische Auswertung	
6.1. Berechnungen und Tests mit den Ergebnissen aus Versuch 1	43

6.2. Berechnungen und Tests mit den Ergebnissen aus Versuch 2	
6.2.1. Tests zur mittleren absoluten Tastfähigkeit	45
6.2.2. Tests zur 50%-Sensibilität	46
6.2.3. Korrelation zwischen mittlerer absoluter Tastfähigkeit und der 50%-Sensibilität	47
6.3. Vergleich zwischen den Daten aus Versuch 1 und Versuch 2	47
7. Ergebnisse aus Versuch 1	48
8. Ergebnisse aus Versuch 2	
8.1. Tastfähigkeit der Frontzähne	52
8.2. Tastfähigkeit der Eckzähne	57
8.3. Tastfähigkeit der Prämolaren	57
8.4. Tastfähigkeit der Molaren	62
8.5. Vergleich zwischen den Tastempfindungen der Front-, Eckzähne, Prämolaren, Molaren	66
8.6. Untersuchung der Korrelation zwischen absoluter Tastfähigkeit und der 50%-Sensibilität	68
8.7. Vergleich der Tastfähigkeit zahnärztlich behandelter und unbehandelter Zähne	68
9. Vergleich der Ergebnisse der Versuche 1 und 2	69
10. Diskussion	
10.1. Prüfung der Tastfähigkeit mit Aluminiumoxid in Joghurt	72
10.2. Prüfung der Tastfähigkeit mit Kupferfolien zwischen antagonistischen Zahnpaaren	76
10.3. Vergleich zwischen Versuch 1 und 2	80
11. Zusammenfassung	82
12. Literaturverzeichnis	83

1. Einleitung

Der stomatognathe Apparat wird als biologischer Funktionskreis aufgefaßt, in dem sich alle Teile gegenseitig beeinflussen (31). Somit können pathologische Veränderungen in einzelnen Bereichen die Funktion in anderen Systemgebieten beeinträchtigen. Dysfunktionsbedingte Zustände sind dabei mit Störungen des morpho-funktionellen Gleichgewichtes im Kauorgan verbunden (30, 68, 69, 89, 90, 91).

Die Zähne nehmen in dem neuro-reflektorischen Regelkreis (6) als die eigentlichen Werkzeuge des Kauapparates (85) eine zentrale Stellung ein. Ihnen obliegen Aufgaben der Nahrungsaufnahme und -verarbeitung, der Sprache, des Tastens von Fremdkörpern, der Gewährleistung der Kieferhaltung und der Ästhetik (12, 68, 69, 85, 89, 91, 125, 134, 159).

Während unter rückgekoppelter zentralnervöser Steuerung Kau-muskulatur, Kiefergelenke sowie Bänder und Ligamente die sogenannten 'freien' Bewegungen des Unterkiefers führen und begrenzen, beeinflussen antagonistische Zahnkontakte mit Hilfe propriozeptiver Organe die Unterkiefermotorik während der Okklusion (12, 16, 20, 26, 29, 36, 37, 40, 42, 43, 54, 55, 68, 69, 81, 90, 91, 94, 103, 104, 110, 123, 133, 134, 135, 140, 142, 147, 151, 156, 166, 169).

Bereits PEASLEE (125) war 1857 die feine Tastsensibilität der Zähne bekannt, die SIGMUND 1867 (154) als "modifizierte Tastwerkzeuge" bezeichnete. Selbst kleinste okklusale Interferenzen werden in maximaler Interkuspitation oder während zahngeführter Bewegungen als Störquellen empfunden und lokalisiert (36, 58, 78, 104, 118, 137, 161, 164).

2. Problemstellung

Die okklusale Harmonie bzw. Disharmonie beeinflusst die Funktionstüchtigkeit des stomatognathen Systems ("Form-Faktor", KROGH-POULSEN). Deshalb ist es von Bedeutung zu wissen, in welchem Bereich sich Veränderungen des okklusalen Reliefs bereits als

Störfaktoren erweisen. Eine okklusale Interferenz wird selbstverständlich erst dann zu einem Hindernis werden, wenn sie der Patient bewußt oder unbewußt registriert. Dies hängt aber mit Wahrscheinlichkeit von der Größe der Berührungsschwelle des "Tastwerkzeuges Zahn" (SIGMUND 154.) ab. Diese Empfindungsschwelle ist die praktische Richtschnur, die die Genauigkeit der okkusalen Integration bei der Eingliederung von Zahnersatz, der Herstellung von Füllungen oder dem Grad der Äquilibration bei Funktionsstörungen diktiert. Die taktile Feinsensibilität der Zähne bestimmt somit u. a. die erforderliche Sorgfalt in der praktischen Tätigkeit des Zahnarztes.

Das Differenzierungsvermögen des odonto-parodontalen Rezeptorapparates (102) und des Kausystems insgesamt kann man auf recht unterschiedliche Weise prüfen:

So ist es z. B. möglich, die maximale Belastungsgrenze von Zähnen durch das Aufbeißen auf verschieden zusammengesetzte Prüfkörper zu bestimmen (1, 6, 7, 106, 112, 117, 162).

Dagegen wird das Lokalisationsvermögen des Zahnsystems getestet, indem man eine leichte Zahnbelastung verschiedener Zähne mit dem subjektiven Empfinden des Patienten vergleicht (58, 78, 118, 125, 161, 164).

Die Unterscheidungsschwelle kann man einerseits zwischen unterschiedlich stark einwirkenden Kräften (8, 9) ermitteln; andererseits ist es möglich, den Schwellenwert zwischen verschiedenen dicken Prüfkörpern (2, 16, 19, 20, 80, 104, 105, 110, 131, 140, 156, 169, 176, 177 - vgl. Tab. 4, S. 21) zu messen oder durch Aufbeißen auf Gegenstände verschiedener Konsistenz zu berechnen (102, 105).

Die Beimengung von Calcium-Carbonat (105) oder kleinen Stahlkugeln (119, 120) in Testnahrung erlaubt es, die Reaktion der parodontalen und oralen Mechanorezeptoren auf Strukturveränderungen der Kost zu untersuchen.

Die taktile Feinsensibilität der Zähne entspricht einerseits der minimalen Belastungsschwelle. Um sie zu ermitteln, wird ein Zahn so lange zunehmend mit einer Kraft belastet, bis die subjektive Berührungsschwelle erreicht ist (13, 29, 39, 41, 61, 71, 74, 99, 101, 105, 111, 113, 115, 162, 163, 164, 171, 175, s. Tab. 1, S. 9).

Tab. 1 UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE ZUR TAKTILEN SCHWELLENWERTBESTIMMUNG BEIM MENSCHEN (ZAHNBELASTUNG) IN DER LITERATUR
(Angaben gerundet in mN)

Autor	Front- zähne	Eck- zähne	Prämo- laren	Mola- ren	Methode/ Belastungsrichtung
EDEL u.a. 1975	>15	-	-	-	elektronischer Um- setzer/50%- Schwelle
GNEUPEL-GREIZ 1951	>10	>20	>30	>59	v. FREY-Reizhaare/ axial
HERHOLZ 1978	>4	-	-	-	federgefesselter Drehschwinger/ axial
JENZ 1976	>5	>7	-	-	federgefesselter Drehschwinger/ axial
JOHANSSON u.a. 1976	-	<100	<100	-	elektromecha- nischer Umsetzer/ 50%-Schwelle
LINDEN 1975	15	-	-	-	elektronischer Umsetzer/ 50%-Schwelle
LOEWENSTEIN u.a. 1955	9	18	24	44	Feder-Ästhesio- meter/axial
MANLY u.a. 1952	10 axial >5 seitlich		>78 axial >18 seitlich		v. FREY-Reizhaare/ axial, seitlich
MÜHLBRADT u.a. 1976	<10	-	-	-	piezo-elektro- nischer Kraft- fühler/axial
MÜNCH u.a. 1931	>10		>15		v. FREY-Reizhaare/ seitlich
STEWART 1927	>69		-	-	Ästhesiometer/ seitlich
WILKIE 1964	>4	13	-	-	Feder-Ästhesio- meter/axial

Alle in der Literatur angegebenen Einheiten wurden in mN umgerechnet ($1 \text{ p} \triangleq 9,8 \text{ mN}$).

Andererseits kann man die taktile Feinsensibilität als die "Tastfähigkeit" (THEIL) der Zähne ansehen. Sie wird festgestellt, indem man die Fremdkörperdicke ermittelt, die gerade noch zwischen natürlichen antagonistischen Zähnen wahrgenommen werden kann. Als Versuchskörper dienen Drähte (67, 87, 167) oder schmale Folien (16, 108, 155, 170 - s. Tab. 2).

Tab. 2 UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE ZUR TAKTILEN SENSIBILITÄT MITTELS ANTAGONISTISCHEM ZAHNKONTAKT (LITERATURÜBERSICHT)

(alle Angaben in μm)

Autor	Front-zähne	Eck-zähne	Prämo-laren	Molaren	Prüfmethode
CAFFESSE u.a. 1973	-	-	-	16	Alufolie
HOLLSTEIN 1933	20	20	30	50	Draht
KRAFT 1962	20				Draht, Haare, Perlonfäden
MELA u.a. 1965	10 - 62				Metallfolie (50%-Sensibilit.)
SIIRILÄ u.a. 1963	8-10	-	8-10		Alu-, Zinnfolie
THEIL 1931	50				Draht
TRYDE u.a. 1962	-	-	10-35 + 15		Silberfolie (50%-Sensibilit.)

Die Festlegung der taktilen Sensibilität eines natürlichen Zahnes als seine Reaktion auf langsam zunehmende Belastung wird physikalisch in Newton ($1 \text{ N} = 1 \text{ kg m/s}^{-2}$) gemessen. Für die zahnärztliche Tätigkeit ist dies eher von theoretischer Bedeutung.

Definiert man die taktile Feinsensibilität natürlicher Zähne jedoch als die Fremdkörper-Dicke, die gerade eben noch zwischen antagonistischen Zähnen empfunden wird, dann resultiert eine Größe, die in Millimetern bzw. Mikrometern gemessen werden kann. Solch eine Schwellenwert-Bestimmung scheint deshalb von größerem

klinischen Interesse, weil sie uns eine konkrete Information über den Größenbereich der erforderlichen Anpassung zahnärztlicher Arbeiten geben kann.

3. Ziele der Arbeit

Im folgenden soll die taktile Feinsensibilität natürlicher Zähne mit zwei unterschiedlichen Verfahren gemessen und miteinander verglichen werden.

Zum einen wird das Differenzierungsvermögen des odonto-parodontalen Rezeptorapparates durch das Ertasten von kleinsten Teilchen in der Nahrung bestimmt (Versuch 1). Zum anderen haben wir die Metallfoliendicke ermittelt, die die Probanden gerade noch zwischen den Zähnen fühlen (Versuch 2).

Da anzunehmen ist, daß die Ergebnisse der Untersuchungen von verschiedenen Einflüssen abhängen können, wurde gleichzeitig ein Zusammenhang mit den folgenden Faktoren überprüft:

- Alter und Geschlecht der Probanden
- Tageszeit der Untersuchung
- Art der Zahnführung
- Größe der Abgleitbewegung zwischen retraler Kontaktposition und maximaler Verzahnung
- Art der Füllungen und Kronen.

Die Auswahl des Untersuchungsverfahrens sollte die anatomischen und physiologischen Gegebenheiten des mastikatorischen Systems berücksichtigen. Auch die Versuchsergebnisse sind nur aus dieser Sicht zu werten. Deshalb werden die Grundlagen im folgenden zusammenfassend dargestellt.

4. Anatomisch-histologische und physiologische Vorbemerkungen

4.1. Struktur, Gefäßversorgung, Nervenverlauf und mechano-elektrisches Transformationssystem des Parodonts

Das Parodont besteht aus Wurzelzement, Desmodont, alveolärer Knochengewebskompakta und marginalem Parodont (48). Es sorgt für eine federnde Aufhängung des Zahnes in seiner Alveole. Die Wurzelhaut beherbergt rhombisch verzweigte und funktionell orientierte Blutgefäße nach Art eines netzförmigen Korbes sowie parallel dazu verlaufende Lymphgefäße. Lymphe, Blut und interstitielle Flüssigkeit bilden ein hydraulisches Flüssigkeitskissen gegen die dynamische Belastung des Zahnes. Sie tragen entscheidend zu seiner funktionellen Bewegungscharakteristik bei (vgl. Kap. 4.3.; 5, 62, 63, 66, 76, 85, 145, 146, 148, 149).

Die bindegewebige Syndesmose zwischen Zahn und Alveolarknochen besteht ferner aus derbfaserigen, unelastischen, sich scheren-gitterartig überkreuzenden und gewellt verlaufenden kollagenen Faserbündeln in funktioneller Anordnung sowie Oxytalanfasern. Die Fasern sind in eine gelartige, amorphe Grundsubstanz eingebettet und dienen zur Weiterleitung von Kräften vom Zahn auf den Knochen. Sie charakterisieren die initiale und desmodontale Zahnbeweglichkeit (35, 62, 63, 76, 85, 138, 145, 148). Die Kollagenfasern verlaufen nicht nur zwischen einem Zahn und seiner Alveole, sondern im Bereich der angewachsenen Gingiva findet man auch transseptale Fasern. Diese verbinden das supra-alveoläre Wurzelzement eines Zahnes mit dem des benachbarten Zahnes (146).

Die Dicke des Parodontalspaltes zwischen Zahn und Knochen ist vom Alter und der Funktion des Zahnes abhängig (21, 35). Der Raum des Periodontalspaltes ist bei einwurzeligen Zähnen 30 - 100 mm³, bei mehrwurzeligen Zähnen 65 - 150 mm³ (146). Er nimmt ferner Nervenäusläufer des N. trigeminus als Endäste des Plexus dentalis superior und des Plexus dentalis inferior einschließlich der Endorgane auf. Man geht heute davon aus, daß die Pulpa des Zahnes lediglich in der Lage ist, nocizeptive Reize zu vermitteln, wogegen die Rezeptoren der taktilen Sensibilität im Desmodont und nicht in der Zahnhartsubstanz liegen (1, 2, 11, 13, 15, 18, 41, 53, 60, 62, 67, 79, 85, 87, 99, 111, 126, 127,

132, 150, 154, 155, 158, 168, 170, 171, 173, 174).

Die somato-sensorische und autonome Innervation des Parodonts wird auf zwei verschiedenen Wegen sichergestellt: dickere Nerven aus ca. 8 - 20 Fasern (145) treten im apikalen Gebiet der Alveole in die Wurzelhaut ein. Sie ziehen sowohl zur Wurzelspitze als auch zum marginalen Parodont. Weitere und dünnere Stämme aus ca. 8 - 10 Fasern (145) erreichen das Desmodont über die Lamina cribrosa des Alveolarknochens. Von dort laufen sie einerseits zur marginalen Gingiva, andererseits zurück zum Apex (2, 4, 10, 11, 15, 25, 35, 75, 82, 98, 136, 146, 155, 174). Es gibt nicht-myelinisierte Fasern zwischen 0,5 und 4 μm und myelinisierte Fasern von 1 bis 16 μm Durchmesser. Die Nervenleitungsgeschwindigkeiten schwanken zwischen 24 und 83 m/s (3, 45, 46, 96, 162).

Keine Einigkeit herrscht über die Art der Nervenendungen. FALIN (33), KADANOFF (75) und WEILL u.a. (174) können keine speziellen Endungen feststellen. BRADLAW (10), FRANK u.a. (34), LAUTENBACH (97), LEWINSKY u.a. (98), SIMPSON (157) und van der SPRENKEL (160) finden ebenfalls keine umkapselten Rezeptoren, sondern sich verästelnde Schlingen und kolbenförmige Verdickungen. SCHOUR (145) berichtet von spindeligen Endorganen und Pacini-Körperchen. BERNICK (4) und KIZIOR u.a. (82) fanden freie Nervenendungen und ovoide Strukturen. Nach CORPRON u.a. (22), FRANK u.a. (34), GRIFFIN und HARRIS (45), RAPP u.a. (136) sowie van der SPRENKEL (160) muß man drei Typen von Mechanorezeptoren im Parodont voneinander abgrenzen. So beschreiben GRIFFIN und HARRIS:

1. Einfache Mechanorezeptoren (Typ I) der Größe 10 x 10 μm , die als isolierte Rezeptoren einzelner myelinisierter Fasern angesehen werden. Der Nerv tritt in den kolbenförmigen Rezeptor und verliert erst recht spät das Myelin. Die Faser spaltet sich auf und bildet ein Netzwerk, das vom myelinisierten Nervenanteil durch Septen getrennt ist. Die Außenkapsel des Rezeptors ist im lockeren Bindegewebe eingebettet. Da das Organ deshalb auf Druck ausweichen kann, könnte es zu den schnell-adaptierenden Nerven-Einheiten gehören.

Die Ernährung der Nervenendung erfolgt durch Diffusion; ihr Schwellenwert ist gering (45, 47, 56).

2. Zusammengesetzte Mechanorezeptoren der Größe $35 \times 45 \mu\text{m}$ (Typ II) ähneln im Aufbau den Muskelspindeln. Der Rezeptor entsteht aus einem myelinisierten Nerven, der sich vorher in mehrere Arme teilt. Diese Fasern verlieren das Myelin und laufen zu Endringen zusammen. Sie umgeben eine benachbarte myelinisierte Nervenfasern einschließlich einigen intraneuralen Kollagenfasern. Die Kapsel um dieses Gebilde liegt eingebettet in extrakapsulären Kollagenfasern, die der Rezeptorlängsrichtung folgen. Der möglicherweise langsam-adaptierende und spontan-entladende Rezeptor reagiert auf Längenänderungen im Parodont. Er wird durch eine Metarteriole ernährt (45, 46, 47).
3. Freie Nervenendungen entstehen aus myelinisierten und nicht myelinisierten Nerven. Sie enden als einfache axonale Verdickungen oder frei in Form baumartiger Verästelungen (44, 45, 57, 82).

4.2. Verteilung der Rezeptoren im Parodont

HANNAM (51) und STEENBERGHE (162) halten die Verteilung sowie die Anzahl von Rezeptoren im Parodont für ungeklärt. HERHOLZ (61) findet keinen einheitlichen Einfluß einer Wurzelspitzenresektion auf die taktile Sensibilität der Frontzähne und nimmt deshalb an, daß die Mechanorezeptoren über die gesamte Wurzeloberfläche gleichmäßig verteilt sind. Zähne mit apikalen Veränderungen sowie parodontalen Destruktionen haben bei MELA u.a. (108) kein unterschiedliches Tastvermögen gegenüber parodontal gesunden Zähnen. Die minimale Belastungsschwelle ist bei Patienten mit und ohne Abbau des Alveolarknochens bei EDEL u.a. (29) gleich. HOLLSTEIN (67) dagegen registriert geringere Tastempfindlichkeiten bei wurzelspitzenamputierten Zähnen sowie solchen mit Abbau des Limbus alveolaris. Histologische Untersuchungen von BERNICK (4), BYERS u.a. (15) und FALIN (33) lassen den Schluß zu, daß Nervenendungen vorwiegend in der apikalen Region liegen.

4.3. Physiologische Bewegungsmechanismen des Parodonts

Das gesunde Parodont besitzt eine spezifische Bewegungscharakteristik, die den Zahn in vorgegebenen Bahnen führt und nur unerheblich durch die Belastungsrichtung verändert werden kann (59, 84, 114, 124). Die Größe der Zahnbeweglichkeit ist abhängig von der Insertionsfläche der Desmodontfasern, von der Form und Zahl der Wurzeln und von strukturellen sowie biophysikalischen Eigenschaften des Parodonts (138). Sie steht in umgekehrtem Verhältnis zu der Fläche der jeweiligen Zahnwurzel (95). Kräfte, die am Zahn angreifen, wirken über die Wurzel direkt auf den komplexen hydro-dynamischen Apparat (62) und damit auf die Rezeptoren. Bei zunehmender Belastungsgeschwindigkeit wächst der Flüssigkeitswiderstand der terminalen Strombahnen, d. h., das Parodont reagiert 'härter'. Dynamische Stöße und hochfrequente Schwingungen fängt deshalb vorwiegend das Flüssigkeitssystem ab (5, 62, 84, 114).

Statische und quasistatische Belastungen (85) führen bis ca. 120 p Belastung und einer Zahnbewegung von ca. 80 μm (63) zu einer Straffung der kollagenen Wurzelhautfasern. Damit ist eine interparodontale Flüssigkeitsverschiebung verbunden (initiale desmodontale Beweglichkeit). Ab ca. 120 p Belastung wirkt sich zusätzlich die elastische Durchbiegung des Zahnes und Alveolar-knochens aus (sekundäre parodontale Beweglichkeit) [95, 130, 138], Zahnbewegungen treten während der Funktion besonders nach lingual und distal (Front nach mesial) sowie nach kranial bzw. kaudal auf. Die Größen liegen für die Leermastikation bei ca. 60 μm , für das Schließen der Zahnreihen bei ca. 10 μm und für Hackbewegungen bei ca. 30 μm (157). Die Beweglichkeit eines Zahnes wird auch durch seine Position innerhalb der Alveole bestimmt. Während des Schlafes und ohne antagonistische Kontakte nimmt der Zahn durch Vermittlung der Terminalstrombahn eine extrudierte Stellung ein. Das kann seinen Lockerungsgrad erhöhen. Im Laufe des Tages verliert der Zahn an Beweglichkeit, da er eine Balancstellung zwischen in- und extrudierenden Kräften einnimmt (65, 124, 129). Ohne den Berührungs-(Tast-)vorgang und die fließende Kontrolle bei dem folgenden Druckanstieg wäre eine physiologische Zahnbewegung gar nicht möglich (62).

4.4. Mechano-elektrisches Transformationssystem der Haut

In der Haut wurden als histologische Äquivalente der Reizung drei Haupttypen von Mechanorezeptoren ermittelt:

Die Merkel-Zellen sind Druckrezeptoren, die als sogenannte Intensitätsdetektoren sowohl die Intensität als auch die Dauer des Reizes messen. Sie adaptieren langsam und werden durch markhaltige afferente Nervenfasern der Gruppe II versorgt.

Die Meissner-Körper sind Berührungsezeptoren. Sie werden als Geschwindigkeitsdetektoren betrachtet, die mittelschnell adaptieren. Der Rezeptor sendet nur während Bewegungen Reize aus. Fasern der Gruppe II leiten seine Impulse zum ZNS. Die Vibrationsrezeptoren senden über Axone der Gruppe II Vibrationsreize weiter, die größer als 60 Hz sind.

Die Beschleunigungsdetektoren - sie entsprechen histologisch den Vater-Pacini-Körpern - adaptieren sehr schnell und reagieren - unabhängig von der Reizstärke - mit nur einem Impuls.

Die mechano-sensiblen freien Nervenenden arbeiten in der Haut als Schwellendetektoren. Sie teilen schwache, sich bewegende Mechanoreize mit, die mit etwa 1m/sec durch Fasern der Gruppe IV weitergeleitet werden.

Die Schwellenwerte bei Deformation liegen für Pacini-Körper bei 0,5 μm , für die taktilen Rezeptoren des Frosches bei 2 μm und für die Muskelspindeln von Katzen bei ca. 10 μm (17). Die Übergänge von Berührung und Druck sind fließend, denn alltägliche mechanische Hautreize betreffen normalerweise mehrere Rezeptoren; die hervorgerufenen Empfindungen lassen sich dennoch nicht nur einem Rezeptortyp zuordnen (17, 144). STEENBERGHE (162) stellt fest, daß die funktionellen Eigenschaften der Parodontalrezeptoren mit den Rezeptoren des übrigen Körpers vergleichbar sind.

4.5. Sinnesphysiologie des Parodonts

Rezeptoren sind spezifische Nervenzellen, die Zustände und/oder Zustandsänderungen an der Körperoberfläche (Exterozeptoren) oder im Körperinnern (Propriozeptoren) an das Zentralnervensystem melden. Jeder Rezeptor reagiert spezifisch auf eine Reizform

(Rezeptorspezifität), wobei der jeweils am besten wirksame Reiz der 'adäquate' Reiz für den Rezeptor ist (17, 27).

Mechanische Belastungen der Zahnkrone führen über Druck- und Spannungsänderungen im Desmodont zu einer Reizung der Wurzelhaut-Rezeptoren (2, 45, 46, 49, 50, 51, 53, 56, 57, 72, 74, 77, 79, 82, 107, 116, 126, 127, 172, 178, 179, 180). Dabei können bis zu drei nebeneinanderliegende Zähne eine Reaktion in einer Nerveneinheit auslösen (51).

Wenn die Kraftrichtung mit der Achse der maximalen Rezeptorensensibilität übereinstimmt, findet man die geringste Latenzzeit, eine maximale Frequenz der Aktionspotentiale und minimale Reizschwellen. Daraus resultiert eine gewisse Abhängigkeit zwischen der Reizantwort und der Reizrichtung (2, 23, 49, 50, 51, 72, 74, 79, 82, 116, 126). Dabei gibt es Nerveneinheiten, die nur auf eine und solche, die auf alle Zahnbelastungsrichtungen reagieren (51).

Eine mechanische Deformation ist der adäquate Reiz, der die Zellmembranen der Mechanorezeptoren depolarisiert; es entsteht ein 'Rezeptorpotential', das so lange besteht, wie der Reiz einwirkt. Der Reizeffekt nimmt bei länger dauerndem konstantem Reiz ab, das heißt, die Rezeptorzelle 'adaptiert' sich mit der jeweils für sie typischen Geschwindigkeit (17, 27, 72).

Erreicht die Depolarisation des Rezeptors eine bestimmte Mindestgröße, das heißt seine 'Reizschwelle', dann werden in dem zugehörigen Nerven - je nach der Reizdauer - ein oder mehrere Aktionspotentiale ausgelöst. Der Übertragungsmechanismus, der mechanische Energie in elektrische Membranpotential-Änderungen verwandelt, ist jedoch noch nicht vollkommen geklärt (17).

Das Axon leitet die Aktionspotentiale an das ZNS weiter, wo sie an den einzelnen Schaltstationen der verschiedenen Neuronen durch Phänomene wie Divergenz, Konvergenz, laterale rückgekoppelte Hemmung und Habituation geformt werden. Dadurch wird im allgemeinen die Übermittlung schwacher Reize gefördert und die starker Reize gehemmt (38, 53, 139, 143, 144).

Die Reizintensität steuert also kontinuierlich die Höhe des Re-

zeptorpotentials. Ab einer gewissen Mindestgröße bestimmt sie die Frequenz der Aktionspotentiale. Die Adaptation des Rezeptorpotentials - eine Empfindlichkeitsänderung des Rezeptors - schlägt sich in einer beständig abnehmenden Frequenz der Aktionspotentiale des Axons nieder (38, 139, 143, 144).

Die absolute Reizschwelle der taktilen Sensibilität natürlicher Zähne kann ermittelt werden, indem man die kleinste Reizstärke sucht, auf die die Mechanorezeptoren im Desmodont unter Vermittlung der Zähne mit einer Änderung der Frequenz ihrer Aktionspotentiale reagieren. Die Aktionspotentiale können in Tierexperimenten direkt von den Dentalnerven abgeleitet werden. Auf diese Weise lassen sich Belastungsschwellen finden (2, 72, 74, 126, 172 - s. Tab. 3) und die Reaktionsweisen der verschiedenen Rezeptoren erforschen (49, 50, 51, 82, 107, 116, 126, 167, 180). Man kann auch die Zahnauslenkungen messen, die diese Aktionspotentiale auslösen (178, 179).

Tab. 3 UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE DER ELEKTROPHYSIOLOGISCHEN BELASTUNGS-SCHWELLENWERTBESTIMMUNG

(Werte gerundet - 1 mN Δ 0,1 p)

Autor	Spezies	getesteter Zahn	Schwellenwert mN
JERGE 1963a	Katze	alle Zähne	Typ I >10 Typ II >20
JOHANSSON u.a. 1976	Mensch	Eckzahn, Prämolar	100
KAWAMURA u.a. 1966	Katze	Eckzahn	20
PFAFFMANN 1939a	Katze	Eckzahn	20
WAGERS u.a. 1960	Hund	Eckzahn, Molar	20
YAMADA u.a. 1969	Hund	Frontzahn, } Eckzahn, } Molar }	40 größerer Wert

Allerdings besitzt diese Reizschwelle nicht in jedem Fall einen konstanten Wert. Sie ist nicht allein von der Stärke des Reizes abhängig, sondern auch von der Änderung der Reizstärke mit der Zeit. Setzt ein zunächst unterschwelliger, aber sich verstärkender Reiz sehr langsam ein, so wird dadurch der Schwellenwert erhöht ("Akkommodation", "Einschleichen"; 17, 38, 139, 162).

Die elektrophysiologischen Untersuchungen zeigten weiter, daß es im Desmodont schnell- und langsam-adaptierende sowie spontan-entladende Nerveneinheiten gibt (1, 49, 50, 51, 72, 79, 82, 107, 116, 122, 127, 167, 173, 180). Die Reizschwellen der langsam-adaptierenden Einheiten scheinen nach Auffassung der meisten Autoren niedrig zu liegen (10 - 30 mN axial; 49, 72, 74, 79). Die Entladungsfrequenz der Einheiten ist proportional dem Logarithmus des Druckes (180). Sie sprechen exakter auf höhere Reizfrequenzen an als schnell-adaptierende Nervenzellen (79, 127). Möglicherweise sind die von GRIFFIN und HARRIS (45, 46) beschriebenen zusammengesetzten Rezeptoren (Typ II) langsam-adaptierend, da sie von den Kollagenfasern des Desmodonts dicht umhüllt und mit ihnen parallel geschaltet sind.

Im Gegensatz dazu antworten schnell-adaptierende Nerveneinheiten während mehrerer Sekunden nicht mehr auf einen neuen Reiz (107, 127). Nach JERGE (72) scheint ihre Reizschwelle höher zu liegen als die der langsam-adaptierenden Zellen (nach HANNAM [49] : 20 - 60 mN axial; nach KAWAMURA u.a. [79] : 294 mN). Sie entladen sich vor allem bei Beginn eines Reizes (49, 116). Das anatomische Korrelat findet sich vielleicht in den kolbenförmigen einfachen Mechanorezeptoren (Typ I), da diese von lockerem Bindegewebe umgeben sind und einem Druck ausweichen können (45, 47, 56).

Daneben existieren gleichfalls spontan-entladende Nerveneinheiten, die ab 20 - 50 mN Belastung ansprechen (173). Druck in einer vorgegebenen Richtung erhöht bei ihnen die Entladungsfrequenz, wogegen Druck aus der Gegenrichtung sie erniedrigt (116, 173).

Die Ursachen für spontane Entladungen könnten in einer geringgradigen mechanischen Deformation der Rezeptoren liegen (50, 107, 116). STEENBERGHE (162) sieht die Ursache der spontanen

Entladungen in einer Dauerspannung des Parodonts, die sich auf die Rezeptoren überträgt. Nach GRIFFIN und HARRIS (45) kommen die zusammengesetzten Rezeptoren (Typ II) als auslösende Empfangsorgane in Frage, da diese eine eigene Blutversorgung aufweisen.

Die einzelnen presso-sensiblen Rezeptoren besitzen nach KIZIOR u.a. (82) unterschiedliche Schwellenwerte. Die Belastungssensibilität in der empfindlichsten Richtung schwankt zwischen 10 und 30 mN ($1 \text{ p} = 9,81 \text{ mN}$) [74], wobei die Schwellenwert-Eigenschaften der Rezeptoren von ihrer viscoelastischen Umgebung bestimmt werden (162).

YAMADA (178, 179) untersuchte die Zusammenhänge zwischen dem Ausmaß der Einzelzahnbewegung und der Auslösung von Aktionspotentialen. Danach muß ein Zahn um mindestens 2 bis 3 μm bewegt werden, um ein Aktionspotential auszulösen. Für deutliche Reizantworten sind Zahnbewegungen von ca. 10 μm erforderlich.

Der menschliche Unterscheidungssinn für eine Krafteinwirkung auf Eckzähne beträgt peripher etwa 3,6 bits. Im Zentralnervensystem wird die Informationsflut wahrscheinlich auf 2,5 bits gedrückt. Die subjektive Unterscheidung von Kraftgrößen ist dabei für geringe Kräfte am größten (24, 53).

Die Mechanorezeptoren des parodontalen Ligamentes sind in der Lage, reflektorisch die Kiefermuskelaktivität zu beeinflussen (26, 36, 37, 40, 134, 142, 147, 160, 162). Die Rezeptoren regulieren dabei die Entladungen von trigeminalen Motoneuronen (12, 54, 55, 77, 78, 103, 151). So kann ein Kiefer-Öffnungsreflex nach Antippen von Zähnen, Gingiva oder hartem Gaumen beobachtet werden. Die Kieferschließmuskulatur wird gleichzeitig über die Muskelspindeln nach kurzer Aktivierung gehemmt. Der Reflex scheint in die Regulation von Kauvorgängen eingebunden zu sein (37, 54, 55, 151).

4.6. Bedeutung der Rezeptoren im Parodont, in der Kaumuskulatur und im Kiefergelenk beim Tastvorgang

Die Frage, wo die für das Tasten von Fremdkörpern zuständigen Rezeptoren lokalisiert sind, scheint noch nicht endgültig geklärt zu sein. Die Literaturangaben widersprechen sich in diesem Punkt (s. Tab. 4).

Tab. 4 UNTERSUCHUNGEN ÜBER DAS DIFFERENZIERUNGSVERMÖGEN
ZWISCHEN VERSCHIEDEN GROSSEN FREMDKÖRPERN IM FRONTZAHN-
BEREICH BEI UNTERSCHIEDLICHEN MUNDOFFNUNGEN

Autor	Art des Meßverfahrens	Größe der Mundöffnung	Lokalisation der Rezeptoren		
			KG ⁺	KM ⁺	PA ⁺
CAFFESSE u.a. 1973	Aluminiumfolien	8-100 μ m	x		x
CHRISTENSEN u.a. 1976	Kupferdraht	2-3 mm		x	
CHRISTENSEN u.a. 1977	Kunststoffstäbe	8-12 mm 43-47 mm		x	-
KAWAMURA u.a. 1960	Stahldraht	1-5 mm	x		x
MANLY u.a. 1952	Scheiben	5-6 mm	x	x	
MORIMOTO u.a. 1976	Stäbe	vertik. Dimension + 8 mm		x	-
RANSJÖ u.a. 1963	Lineal	zwischen Ruhelage u. maxim. Öffn.	x		
RIIS u.a. 1970	Plastikfolien	12-100 μ m	x	x	x
SIIRILÄ u.a. 1972	Zinnfolien Schublehre	0,5 mm bis maxim. Öffn. - 10 mm		x	x
THILANDER 1961	Lineal	zwischen Ruhelage u. maxim. Öffn.	x		

+ KG = Kiefergelenk KM = Kaumuskulatur PA = Parodont

Durch umfangreiche Untersuchungen ist abgesichert, daß ein Zahn bei Belastung in seiner Alveole verschoben wird. Dies reizt die Mechanorezeptoren des Parodonts, die in die neuro-muskuläre Reflexregelung eingeschaltet sind (vgl. Kap. 1, 4.3., 4.5.). Der Informationsfluß ist bei geringen Belastungen am größten und strebt dann einem Maximalwert zu (24, 53). RIIS u.a. (140) sowie SIIRILÄ u.a. (156) schließen aus ihren Untersuchungen mit dünnen Folien zwischen antagonistischen Zahnpaaren, daß beim Erkennen kleiner Fremdkörper das Parodont eine bedeutende Rolle spielt. Je kleiner der Fremdkörper ist, umso mehr wird die taktile Sensibilität des Zahnhalteapparates benötigt. Durch Untersuchungen von CAFFESSE u.a. (16) sowie KAWAMURA u.a. (80) wird diese Auffassung bestätigt.

Bei einer Prüfung mit sehr dünnen Folien können zwischen antagonistischen Zähnen sicherlich - je nach der Zahnstellung - Kontrollkontakte an am Tastvorgang unbeteiligten Zähnen auftreten. Nur die antagonistischen Zähne, bei denen die Folie zwischen den Kontaktpunkten liegt, werden etwa um die halbe Dicke des Fremdkörpers tiefer in die Alveole versenkt als ihre Nachbarn.

Bei weiter Mundöffnung und einem Kontakt der Zähne, der lediglich über große Fremdkörper vermittelt wird, kann das Differenzierungsvermögen zwischen verschiedenen Dicken zwangsläufig nicht mehr ausschließlich durch das Parodont vermittelt werden. Daraus ziehen CHRISTENSEN u.a. (20) sowie MORIMOTO u.a. (110) den Schluß, daß das Parodont für dieses Unterscheidungsvermögen gar nicht zuständig ist.

Andere Autoren nehmen an, daß das Differenzierungsvermögen zwischen verschieden dicken Fremdkörpern allein auf Rezeptoren in der Kaumuskulatur zurückzuführen ist (19, 20, 110). KUBOTA u.a. (94) fanden in allen Kaumuskeln außer dem M. mylohyoideus und dem vorderen Bauch des M. digastricus Muskelspindeln. Muskelspindeln bei Katzen reagieren ab einer Streckung von ca. 10 μ m Längenänderungen der Muskulatur (17). Eine Mitbeteiligung der Kaumuskulatur an Tastvorgängen ist auch für MANLY u.a. (105), RIIS u.a. (140) sowie SIIRILÄ u.a. (156) wahrscheinlich.

THILANDER (169) untersuchte die Innervation der Kiefergelenke und fand freie Nervenenden, Ruffini-Körper, modifizierte Vater-Pacini-Körper und Golgi-Sehnen-Organ. Nach ein- oder beidseitiger Anästhesie der Kiefergelenke stellte sie eine drastisch reduzierte Perzeption der Unterkieferhaltung fest. THILANDER sowie RANSJÖ u.a. (135) glauben deshalb, daß allein das Kiefergelenk für die Unterkiefer-Bewegungs-Perzeption verantwortlich ist. Dagegen ist für CAFFESSE u.a. (16), KAWAMURA u.a. (80), MANLY u.a. (105) und RIIS u.a. (140) das Kiefergelenk am Differenzierungsvermögen zwischen unterschiedlich dicken Fremdkörpern lediglich mitbeteiligt.

4.7. Allgemeine subjektive Sinnesphysiologie

Bisher wurden die Grundlagen mehr aus anatomischer und physiologischer Sicht beschrieben. Es bedarf keiner Frage, daß man sich bei der Messung der taktilen Sensibilität auch mit den subjektiven Wahrnehmungen der Probanden befassen muß.

Die vier Grunddimensionen jeder Wahrnehmung sind Zeitlichkeit, Räumlichkeit, Qualität und Intensität (27). Die vier Aspekte der Berührungsempfindung sind Stereognosis (Raumempfinden), Topognosis (Ortsempfinden), Projektion (Zahn ist 'Vermittler') und Perzeption (Wahrnehmung) [13]. Die Fähigkeit zur oralen Raumempfindung nimmt dabei mit dem Alter ab (14, 100).

Die Empfindungen müssen von der Versuchsperson beurteilt werden, die sich dabei selbst die Richtlinien zur Bestimmung der Intensität dieser Empfindungen gibt ("eigenmetrisches" Meßverfahren - SKRAMLIK [158]). Trotzdem beobachtet man eine weitgehende Übereinstimmung zwischen der subjektiv geschätzten Empfindungsstärke und den objektiv bestimmten Reaktionen der sensiblen Neurone. Auch in der subjektiven Sinnesphysiologie sind also subtile quantitative Messungen möglich (27, 162).

5. Eigene Untersuchungen

5.1. Auswahl und zahnärztlicher Befund der Versuchspersonengruppe

Die Untersuchungen erfolgten an Studenten und an Mitarbeitern der Klinik für Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten der Universität Bonn. Voraussetzung war, daß die Versuchspersonen entweder voll bezahnt, Zahnlücken mit festsitzendem Ersatz verschlossen oder nur Schaltlücken bei dentaler Abstützung in allen vier Quadranten vorhanden waren. Der Zahnhalteapparat mußte klinisch gesund sein und durfte keinen stärkeren Abbau aufweisen. Der Zahnlockerungsgrad lag dementsprechend in physiologischen Grenzen. Probanden mit funktionsbedingten Beschwerden, aber auch solche die Füllungen oder Zahnersatz aufwiesen, die noch nicht inkorporiert waren, wurden von der Untersuchung ausgeschlossen. Insgesamt nahmen an der ersten Untersuchung (Ertasten kleinster Teilchen in der Nahrung) 109 Probanden teil, davon waren 55 weiblich und 54 männlich. Die Altersstruktur geht aus Tab. 5 hervor.

Tab. 5 ALTERSSTRUKTUR DER VERSUCHSPERSONEN

Altersgruppe	Anzahl der Versuchspersonen
10 - 19	8
20 - 29	57
30 - 39	31
40 - 49	7
50 - 61	6

Um einen möglichen Einfluß weiterer Parameter auf die Untersuchungsergebnisse herauszufiltern, erhoben wir weitere Befunde:

- Eine Abgleitbewegung zwischen retraler Kontaktposition und maximaler Interkuspidation wurde mit einem Lineal zwischen den Labialflächen der Ober- und Unterkieferfrontzähne gemessen (s. Tab. 6, S. 25). Dabei wich der Unterkiefer bei 26 Probanden zur Seite ab.

Tab. 6 BEZIEHUNG ZWISCHEN RKP UND MIK ¹⁾

Größe der Abgleitbewegung in mm	Anzahl der Versuchspersonen
ca. 0,5	55
ca. 0,5 - 1	40
ca. 1	13

- Der Befund erstreckte sich ferner auf die Zahnführung bei der Laterotrusion (s. Tab. 7).

Tab. 7 ZAHNFÜHRUNGSTYPEN

Zahnführung	Anzahl der Versuchspersonen
Front-, Eckzahnführung	11
Gruppenführung	56
initial Gruppen-, später Eckzahnführung	33
Kombination links und rechts verschiedener Zahnführungen	7
Balancekontakte	59
Hyperbalancenführung	2

- Die zahnärztliche Versorgung des Kollektivs geht aus Tab. 8 (s. S. 26) hervor. Bei 38 Versuchspersonen war eine kieferorthopädische Behandlung vorausgegangen.

¹⁾ RKP = retrale Kontakt-Position
MIK = maximale Interkuspidations-Position

Tab. 8 ZAHNÄRZTLICHE VERSORGUNG DER VERSUCHSPERSONENGRUPPE

Art der Versorgung	Anzahl der Versuchspersonen
keine Füllungen und Kronen	3
Kunststoff-/Amalgamfüllungen	32
Inlays/Onlays/Kronen	20
Kunststoff-/Amalgamfüllungen sowie Inlays/Onlays/Kronen	22
Brückenzwischenglieder	14
Kunststoff-/Amalgamfüllungen, Inlays/Onlays/Kronen sowie Brückenzwischenglieder	18

5.2. Untersuchung der Feinsensibilität des Parodonts mit Hilfe von Fremdkörpern in der Nahrung (Versuch 1)

5.2.1. Auswahl der Prüfkörper

Für eine Untersuchung der Feinsensibilität mit Fremdkörpern in der Nahrung sind Prüfkörper erforderlich, die einerseits in genügend dicht aufeinanderfolgenden Größen lieferbar und physiologisch verträglich sind, sich andererseits durch Feuchtigkeit nicht verändern.

Wir dachten zunächst an Stahlkugeln, doch waren diese in den erforderlichen Größen nicht zu bekommen. Bei unerwartetem Aufbeißen hätte außerdem die Gefahr von Zahnfrakturen bestanden. Unsere Wahl fiel deshalb auf kristallisiertes Aluminiumoxid (Al_2O_3 , Korund). Dieses wird wie Bikorit[®] 1) und Redurit[®] 1) normalerweise als Schleifrostoff benutzt. Die Materialien lagen uns in den folgenden Größenbereichen vor (FACHVERBAND ELEKTROKORUND- UND SILIZIUMKARBIDHERSTELLER [32]):

1) Der Fa. Dynamit Nobel AG, Bereich ES, Haberstr. 2, 5210 Troisdorf-Oberlar danken wir herzlich für die freundliche und schnelle Bearbeitung unserer Wünsche sowie für die kostenlose Überlassung der Prüfkörper.

Tab. 9 KORN-GRÖSSENBEREICHE VON BIKORIT[®] UND REDURIT[®]

Schleifrohstoff	FEPA-Bezeichnung	Korn-Größenbereich in μm
Bikorit	F 1200 "CS"	2,5 - 3,5
"	F 800 "CS"	5,5 - 7,5
"	F 500	11,8 - 13,8
Redurit	F 360 "CS"	21,3 - 24,3
"	F 280 "CS"	35,0 - 38,0
"	F 240 "CS"	42,5 - 46,5
"	F 230 "CS"	50,0 - 56,0
"	180 SN	62,0 - 88,0
"	120 SN	105,0 - 125,0
"	100 SN	149,0 - 177,0

Die typischen Eigenschaften von Bikorit[®] sind große Härte und Sprödigkeit, von Redurit[®] große Härte und Zähigkeit. Die Rohstoffe enthalten geringe Mengen an Verunreinigungen, die als Oxide im Korn gebunden sind; sie sind nicht leitend, nicht hydratisierend und chemisch völlig inert (28). Ein deutlicher Nachteil der Schleifkörper für unsere Versuche lag in ihrer inhomogenen Struktur, die erheblich von der Idealform der Kugel abwich (s. Abb. 1, S. 28).

Als Trägermedium für die Prüfkörper haben wir Joghurt¹⁾ ohne Geschmack gewählt. Joghurt hat keine eigene mit den Zähnen tastbare Struktur und liegt in einer Konsistenz vor, die eine schwerkraftbedingte Sedimentation der Al_2O_3 -Teilchen verhindert.

1) Albrecht Einkauf OHG, Mülheim

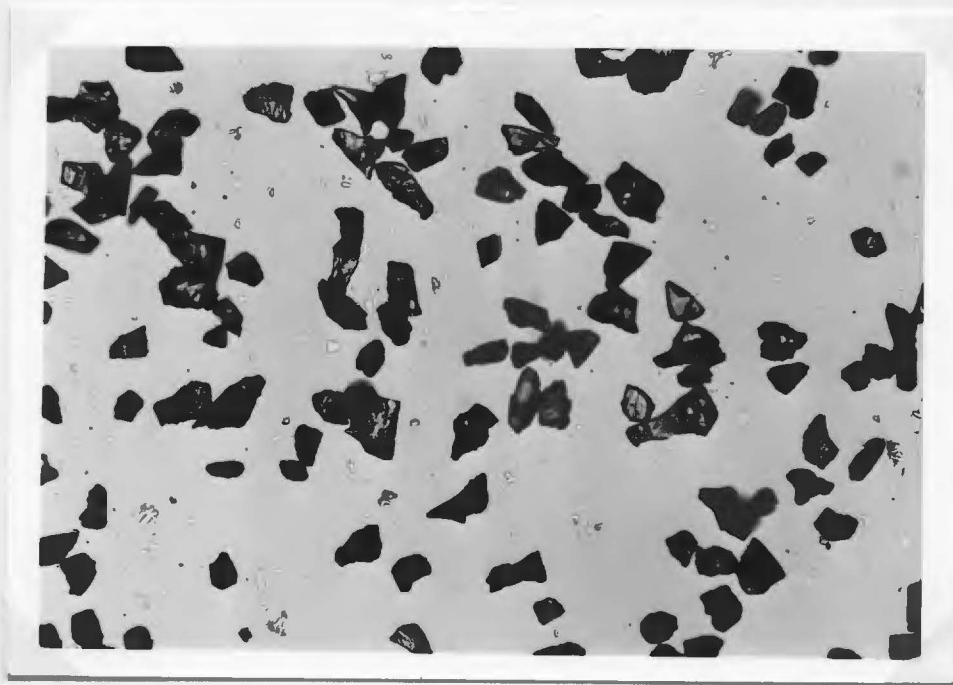


Abb. 1 OBERFLÄCHENSTRUKTUR DER PRÜFKÖRPER
(Bereich: 11,8 - 13,8 μm)

5.2.2. Vorversuche

Um eine sinnvolle Konzentration der Aluminiumoxid-Körner in der Joghurt zu erreichen, wurden mit 27 Probanden Vorversuche unternommen. Jeweils 50, 100, 200, 300, 400 und 500 mg¹⁾ Redurit[®] der Größen 180 SN (bis 88 μm) und F 240 "CS" (bis 46,5 μm) mischten wir mit dem Knetaken eines handelsüblichen elektrischen Handrührers in je 125 g (= ca. 108 ml Joghurt).

Die Versuchspersonen sollten beurteilen, bei welcher Korngröße sie Prüfkörper zwischen den Zähnen entdeckten. Da eine Knochenleitung über die Zähne zum Innenohr die Ergebnisse möglicherweise verfälscht hätte, wurden die Ohren der Probanden mit 'linearem weißem Rauschen' vom Tonband²⁾ über Kopfhörer³⁾ bespielt.

1) elektrische Waage Mettler E 200/9

2) Lineares weißes Rauschen vom Random Noise Generator Typ 1402 der Fa. Brüel & Kjoer, Kopenhagen; aufgenommen mit dem Cassettonband AIWA AD 6900 auf das Bandmaterial Maxell UD XL II.

3) Pearlless PMB 4

Einerseits sollte bei jedem Aufeinandertreffen der Zahnreihen die Möglichkeit bestehen, Korundteilchen zu tasten. Andererseits war eine Übereinanderschichtung von Prüfkörpern während des Tastens möglichst zu vermeiden. Wir entschlossen uns deshalb, die Konzentration der Prüfkörper in der Joghurt als 'Referenzkonzentration' anzusehen, die gerade eben noch von 100% der Probanden entdeckt wurden. Diese 'Referenzkonzentration' entsprach bei Redurit[®] 180 SN: 400 mg in 125 g Joghurt und bei F 240 "CS": 300 mg in 125 g Joghurt. Sie wurde nun auf die anderen Teilchengrößen von Redurit[®] und Bikorit[®] übertragen. Dabei sollte die Wahrscheinlichkeit für jedes Korundkorn in der Joghurt gleich hoch sein, an einen Kontaktpunkt zwischen den Zähnen zu gelangen. Um diese gleichen Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Korngrößen zu berechnen, haben wir zunächst eine der Referenzkonzentration entsprechende Menge (= 400 mg in 108 ml) von Prüfkörpern aller Größen in 70%iger Saccharose-Lösung in Photometer-Küvetten suspendiert (s. Abb. 2).

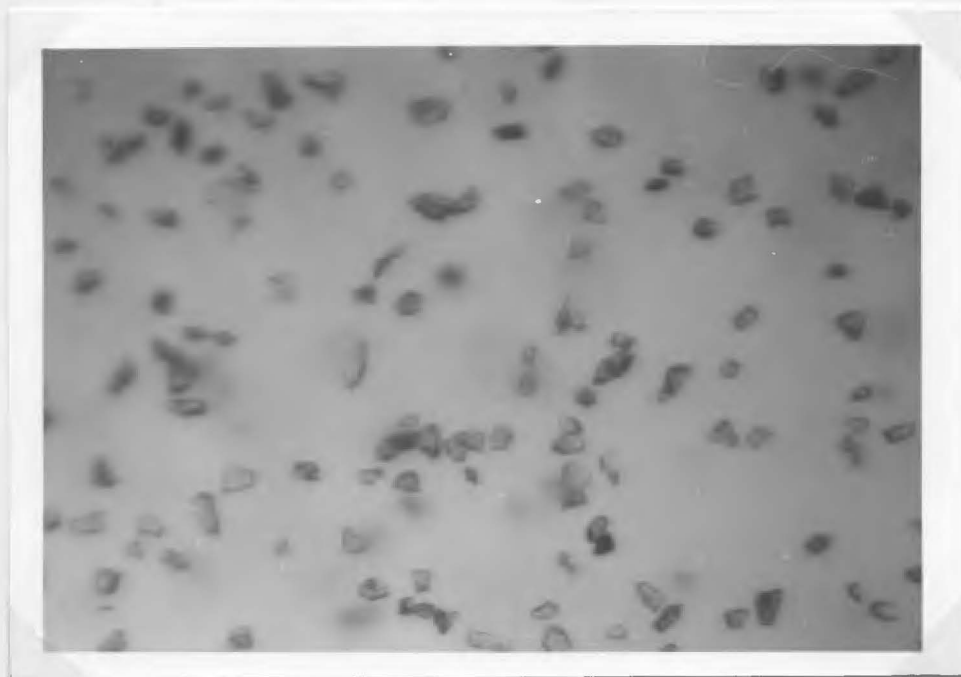


Abb. 2 VERTEILUNG VON PRÜFKÖRPERN IN 70%IGER SACCHAROSELÖSUNG

Wir nahmen dann einen über eine Fernsehkamera an ein Mikroskop¹⁾ angeschlossenen Rechner²⁾ zur Hilfe, um die Projektionsflächen der einzelnen Schleifkörper einer jeweiligen Größe zu bestimmen. Der zugrundeliegende Gedanke war, für jedes Prüfkörpergrößenintervall die gleiche Projektionsfläche der Korundteilchen wie in der Referenzkonzentration zu bestimmen. Leider ließ sich diese Vorstellung nicht verwirklichen. Wir konnten lediglich die gleiche Anzahl von Prüfkörpern der einzelnen Größenbereiche in der Joghurt ermitteln. Wir haben bei den ersten 20 Probanden Versuche nach diesem Muster durchgeführt.

In einer zweiten Versuchsreihe beurteilten die Probanden die 'Referenzkonzentration' (400 mg in 125 g Joghurt) ungeachtet der Prüfkörpergrößen. In der Regel konnten die Versuchspersonen nur größere Prüfkörper entdecken, wenn das Konzentrationsmaß die gleiche Anzahl von Korundteilchen enthielt. Lag dagegen dem Konzentrationsmaß die gleiche Gewichtsmenge von Prüfkörpern unterschiedlicher Größe zugrunde, so ertasteten die Probanden auch noch kleinere Prüfkörper. Daraufhin entschlossen wir uns, die Versuchsreihe mit 400 mg Schleifkörpern auf 125 g Joghurt (= 0,3%) für alle Größenbereiche fortzuführen.

5.2.3. Endgültiger Versuchsaufbau

Die Untersuchungen fanden in einem ruhigen Raum statt. Vor Beginn gaben wir den Probanden einen Merkzettel, auf dem Ziel und Ablauf des Versuchs wie folgt beschrieben waren:

Merkzettel mit der Beschreibung des Versuchsablaufs für die Probanden

Versuchsablauf:

Tastempfindlichkeit der Zähne während des Kauens

Das Ziel der Untersuchung liegt in der Feststellung der Tastfähigkeit der Zähne.

1) Videomat, Zeiss

2) Wang 700

Zu diesem Zweck wurden unschädliche Prüfkörper jeweils unterschiedlicher Größen in verschiedenen Joghurtbechern verteilt. Mittels normaler Kaubewegungen (wie beim Kauen von Brot) soll entschieden werden, ob sich 'Körner' zwischen den Zähnen in der Joghurt befinden oder ob das Trägermedium 'glatt' ist, also keine 'Körner' zu tasten sind. Es befinden sich Joghurtbecher mit und ohne 'Körner' im Test.

Der Versuchsperson wird ein Teelöffel Joghurt mit oder ohne 'Körner' angeboten. Der Joghurt soll möglichst zunächst nicht sofort geschluckt, sondern mit Brot-Kaubewegungen geprüft werden. Sobald der Proband Prüfkörper irgendwo zwischen den Zahnreihen spürt, muß er dies mit deutlich nickenden Kopfbewegungen dem Untersucher sofort mitteilen. Waren keine Prüfkörper zu tasten, so müssen vor der endgültigen Entscheidung mindestens 10 Kaubewegungen durchgeführt und der Untersucher erst dann informiert (Kopf schütteln) werden.

Nach der Entscheidung kann der Joghurt geschluckt oder ausgespuckt werden; auch ist der Mund sehr gut zu spülen, um alle Prüfkörper auf den Zähnen zu entfernen (u. U. Zahnbürste benutzen). Die vollständige Entfernung aller Fremdkörper soll durch Tastbewegungen der Zähne kontrolliert werden.

Da Fremdkörper zwischen den Zahnreihen nicht nur gefühlt, sondern auch per Knochenleitung gehört werden können, muß während des Tests das Gehör mittels Kopfhörer und Rauschgeräuschen ausgeschaltet werden. Dazu werden die Ohren gut abgedichtet. Der Kopfhörer kann beim Umspülen abgenommen werden.

Die wichtigsten Punkte wurden kurz wiederholt und eventuell vorhandene Fragen geklärt. Die Probanden nahmen dann in bequemer Position im Behandlungsstuhl Platz. Über den Kopfhörer wurde möglichst laut lineares 'weißes Rauschen' vermischt mit 'rosa Rauschen'¹⁾ von dem Cassettentonbandgerät auf die Ohren der Versuchspersonen gespielt.

1) aufgenommen vom Korg Synthesizer, Modell MS-50

Für jeden Versuch standen zehn Joghurttöpfe mit verschiedenen Prüfkörpergrößen zur Verfügung (vgl. Tab. 9, S. 27). Die Konzentration betrug 400 mg Korund pro 125 g Joghurt, entsprechend den Vorversuchen.

Für jeden Test erhielten die Probanden dann einen Teelöffel Joghurt, wobei wir für jede Probe einen neuen Löffel nahmen. Die Versuchspersonen konnten nicht sehen, aus welchen Bechern der Joghurt jeweils entnommen wurde.

Zunächst testeten wir mit abnehmenden Prüfkörpergrößen. Auf diese Weise bestimmten die Probanden ihren individuellen Schwellenwert, das heißt, die Prüfkörpergröße, die sie gerade noch zwischen den Zähnen ertasten konnten. Im Anschluß an die Probe, in der die Probanden die Prüfkörper gerade nicht mehr ertasten konnten, erhielten sie nochmals eine Probe mit ihrer Schwellenwertgröße. Erkannten die Probanden diese erneut, sollten sie wieder die nächst kleineren Prüfkörper testen. Nach dieser Methode sicherten wir den Schwellenwert dreimal ab.

Es zeigte sich, daß einige Versuchspersonen eine bestimmte Prüfkörpergröße einmal positiv ertasteten, ein anderes Mal nicht erkannten. In diesen Fällen wurde nach insgesamt fünf Tests die Prüfkörpergröße als Schwellenwert notiert, die mindestens dreimal positiv ertastet wurde.

Um die methodischen Fehler gering zu halten, stellten wir den Versuchspersonen im Anschluß an die knapp dreißig Minuten dauernde Untersuchung folgende Fragen:

1. Haben Sie auch mit der Schleimhaut, den Lippen oder der Zunge etwas von den Prüfkörpern empfunden?
2. Haben Sie durch die Knochenleitung etwas von den Prüfkörpern gehört, oder haben Sie sie nur zwischen den Zähnen gespürt?
3. Haben Sie vorwiegend mit den Front-, den Seitenzähnen oder mit beiden getastet?

Wir haben 48 Probanden an jeweils einem Tag zu verschiedenen Zeiten und 24 Versuchspersonen an verschiedenen Tagen zu etwa gleichen Zeiten untersucht. Nur sechs Personen wurden lediglich einmal geprüft. Insgesamt führten wir 297 Tests durch.

5.2.4. Kritik am Versuchsaufbau

Mit der in Kap. 5.2.3. vorgestellten Methode kann das Tastvermögen einzelner Zähne grundsätzlich nicht ermittelt werden.

Einer der Schwachpunkte der Untersuchung hängt mit den Eigenschaften der Korund-Schleifkörper zusammen, die nicht in konstanten Größen, sondern nur in Größenintervallen vorlagen. Der Grund liegt in ihrer inhomogenen, oft splittrigen Struktur, die von der Idealform einer Kugel stark abweichen kann (vgl. Abb. 1, S. 28).

Ein Bruch durch Zerbeißen der Schleifkörper-Teilchen während Zahnkontakt - und damit eine Größenänderung der Prüfteilchen - kann nicht völlig ausgeschlossen werden.

In der Natur von Schleifkörpern liegt ihre Rauhigkeit. Deshalb ist es möglich, daß nicht die Prüfkörperdicke, sondern allein deren Oberflächenstruktur erkannt wurde. Einige Probanden gaben so am Versuchsende an, daß ihre Zähne "stumpf" seien.

Da als Konzentrationsmaß für die Prüfkörper verschiedener Größe die Gewichtsmenge zugrunde lag, kann nicht davon ausgegangen werden, daß in jedem Größenbereich die Verteilung der Prüfkörper in der Joghurt identisch war. Deshalb variiert die Wahrscheinlichkeit in den einzelnen Größenbereichen, beim Tasten auf ein Prüfkorn zu treffen. Dies ist auch wegen der nicht volumengleichen Teelöffel-Entnahme der Joghurt, der nicht zu erfassenden Verdünnung durch Speichel sowie der unbekannten Verteilungsweise der Prüfkörper im Mund vor und beim Zahnreihenschluß ein kaum zu lösendes Problem. Dies scheint uns jedoch keine sehr große Rolle zu spielen, da es nicht Aufgabe der Untersuchung war, die einzelnen Testreihen untereinander zu vergleichen. Ein geringer Einfluß auf die absolute Höhe der Schwellenwerte im Endergebnis kann jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Wie aus den Vorversuchen ersichtlich ist, kann der Schwellenwert auch von der Menge der Prüfkörper im Trägermedium beeinflusst werden. Er ist also nicht allein von der Größe der Partikel abhängig.

Die meisten Probanden wurden nach Möglichkeit zunächst dreimal an einem Tag bestellt (zwischen 8 und 11, 11 und 14 sowie 14 und 18 Uhr). Bei einem solchen Versuchsaufbau kann ein Übungseffekt nicht ohne weiteres von einer Tageszeitabhängigkeit unterschieden werden.

5.3. Untersuchung der Feinsensibilität des Parodonts mit Hilfe von Metallfolien zwischen antagonistischen Zahnpaaren (Versuch 2)

5.3.1. Auswahl des Prüfmateri als

Zur Untersuchung der Feinsensibilität der Parodontien ausgesuchter antagonistischer Zahnpaare eignen sich Drähte nicht besonders, da deren genaue Orientierung auf möglicherweise punktförmige antagonistische Kontaktareale sehr schwierig ist. Demgegenüber lassen sich schmale, dünne Folien ohne größere Probleme zwischen den Zähnen applizieren.

Solche Folien müssen einander entgegengerichtete Materialeigenschaften besitzen. Sie sollen sich beim Zusammenbiß einerseits der Zahnoberfläche widerstandslos anpassen, um die Auslösung vorzeitiger Berührungsreize beim Zahnreihenschluß zu vermeiden. Andererseits soll das Material so hart sein, daß sich seine Dicke auch während und nach mehrfachen Zahn-Tastbewegungen nicht ändert. Kunststofffolien kommen deshalb nicht in Betracht. Weiterhin ist ein Material zu fordern, das im Munde zu keiner galvanischen Elementbildung zwischen Gold- und Amalgamarbeiten führt.

Als Prüfkörper wählten wir deshalb Metallfolien aus 99,9% reinem Kupfer in Dicken zwischen 3 und 250 µm mit einer jeweiligen Toleranz von $\pm 10\%$ ¹⁾. Im folgenden sind die Materialeigenschaften der verwendeten Kupferfolien (nach Firmenangaben von GOODFELLOW METALS Ltd.) zusammengefaßt.

¹⁾ Fa. Goodfellow Metals Ltd., Milton Road, Cambridge, England

Kompressionsfähigkeit	$0,73 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$
Härte	45 - 55 DPH
Dichte	$8,96 \text{ gcm}^{-3}$

Die geforderte Anpassungsfähigkeit des Prüfmaterials an die Kaufläche erfüllte das Kupfer nur in den kleinen Dickenbereichen. Mit zunehmender Dicke (über ca. 50 μm) erwiesen sich die Folien als zu starr.

5.3.2. Versuchsaufbau bei den Folienversuchen

Bei 73 Probanden, die am Versuch 1 (Ermittlung der Tastfähigkeit mit Prüfkörpern in Joghurt) teilgenommen hatten, wurde ebenfalls die Tastfähigkeit mit Kupferfolien getestet. 37 Versuchspersonen waren männlich und 36 weiblich. Die Altersstruktur des Kollektivs geht aus Tab. 10 hervor.

Tab. 10 ALTERSSTRUKTUR DER VERSUCHSPERSONEN

Altersgruppe	Anzahl der Versuchspersonen
10 - 19	4
20 - 29	35
30 - 39	23
40 - 49	7
50 - 61	4

In die vor dem eigentlichen Testbeginn vorgenommenen zahnärztlichen Befundaufnahmen (vgl. Kap. 5.1.) wurde zusätzlich die Lage vorhandener Restaurationen einbezogen (s. Tab. 11, S. 36).

Vor Beginn des Versuchs gaben wir den Probanden wieder einen Merkzettel mit der Beschreibung des Versuchsablaufs (s. S. 37). Auch hier betonten wir anschließend nochmals die wesentlichen Punkte und klärten noch offene Fragen.

Die Probanden saßen in bequemer Position im Behandlungsstuhl. Über den Kopfhörer wurde unter Zwischenschaltung eines Misch-

Tab. 11 ZAHNÄRZTLICHER VERSORGUNGSZUSTAND ANTAGONISTISCHER FRONT- UND ECKZÄHNE, PRÄMOLAREN UND MOLAREN

zahnärztliche Versorgung	Front- zähne	Eck- zähne	Prämo- laren	Molaren
Gesamtzahl	71	65	70	71
unbehandelt	55	54	24	8
Füllungen	12	8	8	20
eine Krone/Inlay/Onlay pro Zahnpaar	4	2	16	5
ein Brückenzwischen- glied pro Zahnpaar	1	1	1	1
zwei Kronen/Inlays/Onlays pro Zahnpaar	-	-	15	21
zwei Brückenzwischen- glieder pro Zahnpaar	-	-	-	2
Füllungen/Kronen	-	-	2	4
Füllungen/Brückenzwischen- glied	-	-	-	1
Kronen/Brückenzwischen- glied	-	-	4	9

pultes¹⁾ möglichst laut 'weißes' und 'rosa' Rauschen von dem Cassettentonbandgerät übertragen. Der Untersucher hatte die Möglichkeit, mittels Mikrofon²⁾ über das Mischpult und den Kopfhörer Anweisungen an die Versuchsperson zu geben (s. Abb. 3, S. 38).

Die Tests begannen im Bereich der Frontzähne. Das Einnehmen einer Schneidekante-Schneidekante-Position (Kopfbiß) wurde dazu mehrfach eingeübt. Die antagonistischen Kontaktflächen in dieser Stellung haben wir dann mit doppelt gelegtem Farbband³⁾ markiert. Nach Möglichkeit wurde zwischen den Schneidezahnpaaren 11/41 oder 21/31 geprüft (s. Abb. 4, S. 38).

1) Vivanco Modell 9750

2) Senator Electret Kondensator Richt-Mikrofon Nr. 381.541

3) Hanel-Folie, Gebr. Hanel Medizinal, Nürtingen; einfache Lage 8 µm dick

Merkzettel mit der Beschreibung des Versuchsablaufs für die Probanden

Versuchsablauf:

Tastempfindlichkeit von vier verschiedenen antagonistischen Zahnpaaren

Das Ziel der Untersuchung liegt in der Feststellung der geringsten Fremdkörperdicke, die noch mit den Zähnen getastet werden kann.

Zu diesem Zweck werden schmale Kupfer-Folien von unterschiedlicher Dicke mit einer Pinzette zwischen sich gegenüberstehende Zahnpaare gehalten. Dazu erweist sich eine vorherige Kennzeichnung der Zähne mit Farbfolie als notwendig.

Da Fremdkörper zwischen den Zähnen nicht nur gefühlt, sondern in erheblichem Umfang auch per Knochenleitung gehört werden können, muß während des Tests das Gehör mittels Rauschen durch Kopfhörer ausgeschaltet werden. Gleichzeitig werden die Ohren gut abgedichtet. Die Anweisungen zum Testablauf (Mund "auf" oder "zu") geben wir den Testpersonen über die Kopfhörer. Die Augen sollen geschlossen werden. Nach "zu" soll die Versuchsperson entscheiden, ob eine Folie zwischen den Zähnen sicher gefühlt wird. Die Zähne sollten keine Reibebewegungen, sondern lediglich "auf-zu"-Bewegungen gegeneinander ausführen.

Das Ergebnis der Entscheidung soll dem Untersucher ohne Kopfbewegung durch kurzen Knopfdruck mittels Handschalter mitgeteilt werden. Sobald das Ergebnis feststeht, soll der Mund etwas geöffnet werden, damit ein neuer Test stattfinden kann.

Der Versuch wiederholt sich 15mal, da jede Folie insgesamt mit 15 Tests pro Zahnpaar geprüft wird. Dabei wird sich die Folie nicht immer zwischen den Zähnen befinden. Es können durchaus auch Testserien vorhanden sein, bei denen sich keine Proben zwischen den Zähnen befinden.

Um zu vermeiden, daß die Folien mit der Mundschleimhaut oder der Zunge gespürt werden, hält der Untersucher während des Versuchs die Wange mit einem Instrument zur Seite. Auch die Zunge soll während des Versuchs die Folie nicht berühren. Andernfalls muß der jeweilige Test wiederholt werden.



Abb. 3 TESTSITUATION BEI DER ERMITTLUNG DER TASTFÄHIGKEIT MIT
HILFE VON METALLFOLIEN



Abb. 4 TESTSITUATION IM FRONTZAHNBEREICH

War dies wegen der Kontaktverhältnisse nicht möglich, so wurde auf die Scheidezahnpaare 12/42 oder 22/32 ausgewichen.

Praktisch gingen wir folgendermaßen vor: eine ca. 2 x 15 mm dimensionierte Kupferfolie wurde mit Hilfe einer Klemmpinzette bei leicht geöffnetem Mund und geschlossenen Augen dicht über den im Oberkiefer befindlichen Testzahn gehalten. Rückmeldungen durch Zungen-, Lippen- oder Wangenkontakte versuchten wir durch Beobachtung und Instruktion sowie durch die Benutzung von Mundspiegeln oder Wangenhaltern zu vermeiden.

Bei der Anweisung "zu" brachte der Proband den Unterkiefer in die eingeübte Kopfbißstellung. Glaubte er eine Folie zwischen den Zähnen zu spüren, so betätigte er den Knopf eines Handschalters. Dieser war mit einem elektronischen Zähler (s. Abb. 5) verbunden. Tastete die Versuchsperson keine Folie, öffnete sie den Mund wieder, so daß ein neuer Test beginnen konnte.



Abb. 5 ELEKTRONISCHER ZÄHLER MIT FUSS- UND HANDSCHALTER

In den Zähler konnte der Untersucher über einen Fußschalter ohne Unterbrechung des Tests die jeweilige Versuchszahl bei einer bestimmten Folienstärke eingeben und ablesen. Die elektronische Schaltung zählte auf diese Weise fünfzehn Tests und mischte in zufälliger Reihenfolge fünf 'Leerwerte' darunter. Das Gerät zeigte also an, bei welcher Testnummer eine Folie zwischen den Zähnen zu liegen hatte und wann nicht. Gab der Proband bei einem 'Leertest' an, eine Folie zu tasten, so wurde dies vom Zähler separat vermerkt.

Wir begannen die Untersuchungen immer mit der dicksten Folie und testeten in absteigender Reihenfolge jede Folienstärke zehnmal, zusätzlich wurden fünf Leerproben durchgeführt. Die Prüffolien lagen dabei in den Dicken 500, 250, 150, 125, 100, 75, 68, 50, 40, 34, 25, 20, 15, 10, 7, 6 und 3 μ m vor. Nach dem Test einer Stärke notierten wir, wie oft der Proband bei den zehn tatsächlichen Folienproben diese getastet hatte und wie oft er bei Leerversuchen eine positive Tastempfindung angab.

Beendet wurde die Testreihe an einem antagonistischen Zahnpaar dann, wenn der Proband nicht mehr in der Lage war, einen Fremdkörper zu entdecken bzw. wenn die mit 3 μ m dünnste Folie erkannt war. Die einzelnen Folien wurden jeweils gegen neue ausgetauscht, wenn 'Bißspuren' sichtbar wurden, die eine konstante Dimension nicht mehr gewährleisteten.

Nach dem Test der Frontzähne folgten die Eckzähne. Sie wurden auf die gleiche Weise in Kanten-Kanten-Position überprüft (s. Abb. 6, S. 41).

Prämolaren (s. Abb. 7, S. 41) bzw. Molaren haben wir dagegen in maximaler Interkuspidationsposition des Unterkiefers geprüft. In diesen Fällen wurde die Testfolie vor Testbeginn durch Zahnreihenschluß dem Kauflächenrelief angepaßt. Bei den Seitenzähnen wurden die Folien so zwischen die Kauflächen gehalten, daß ein Zungen- oder Wangenkontakt ausgeschlossen war.

In den meisten Fällen wurden nur Zähne der rechten Kieferseite geprüft. Nur wenn die Kontaktverhältnisse rechts eine Prüfung nicht zuließen, mußten wir auf die linke Seite ausweichen. Wir



Abb. 6 TESTSITUATION BEI DEN ECKZÄHNEN



Abb. 7 TESTSITUATION IM PRÄMOLARENBEREICH

testeten insgesamt 72 Frontzahn-, 66 Eckzahn-, 71 Prämolaren- und 72 Molarenpaare.

Der gesamte Versuch erforderte von den Probanden außerordentliche Konzentration. Am Ende des ca. zweiständigen Versuchs stellten wir folgende Fragen:

1. Haben Sie auch mit der Schleimhaut, den Lippen oder der Zunge die Prüffolien gespürt?
2. Haben Sie über die Knochenleitung den Kontakt mit den Prüffolien gehört, oder haben Sie die Folie nur zwischen den Zähnen gespürt?
3. Haben Sie einen metallischen Geschmack oder galvanische Ströme im Mund empfunden?
4. Haben Sie eine Verbiegung der Folie beim Tasten gefühlt?

Die Antworten geben Aufschlüsse über mögliche methodische Fehler.

5.3.3. Kritik am Versuchsaufbau

Ideale Prüfkörper für die durchgeführten Tests sind schwierig zu finden. Die Probleme bei der Materialauswahl wurden in Kap. 5.3.1. erläutert.

Die Versuchsergebnisse können nicht nur vom Material, sondern auch vom Untersucher beeinflusst worden sein, z. B. verursachen unruhig gehaltene Folienstreifen möglicherweise vorzeitige Berührungsreize.

Manche Probanden neigten dazu, auf den Kontaktflächen bzw. Folien zu reiben, statt senkrechte Tastbewegungen durchzuführen. In solchen Fällen wird weniger die Dicke der Folie als vielmehr deren Oberflächenbeschaffenheit beurteilt.

Auch konnten der Kaudruck während des Tastvorgangs und die Dynamik der Bewegungen nicht standardisiert werden.

Einige wenige Probanden gaben nach dem Test an, ab und zu galvanische Ströme oder einen metallischen Geschmack verspürt zu haben.

Durch Kopfhörer, Mundspiegel oder Wangenhalter sowie die lange

Versuchsdauer (ca. zwei Stunden) mögen auch Konzentrationseinbußen das Versuchsergebnis beeinflusst haben. Die lange Versuchsdauer ermöglichte nur einen Test pro Person. Tageszeitliche Schwankungen der Tastfähigkeit haben wir deshalb nicht direkt erfaßt.

Ob die Knochenleitung zum Innenohr mit Hilfe des Rauschens völlig unterbunden wurde, ist nicht zu objektivieren.

Der Tastvorgang der Seitenzähne unterschied sich sowohl in Unterkieferhaltung als auch in den Kontaktverhältnissen von dem der Front- und Eckzähne - bedingt durch die Versuchsanordnung. Je nach dem Zahnführungstyp und der Zahnstellung waren die Prämolaren und Molaren während der Untersuchung der Front- und Eckzähne discludiert. Im Seitenzahnbereich konnten die Probanden bei geringen Folienstärken u. U. weitere Zahnkontakte außer den Testzähnen unbewußt zu Hilfe nehmen. Eine Positionsänderung des Unterkiefers bei einem Test mit Folie im Vergleich zu einem 'Leerversuch' ist ebenso denkbar.

6. Statistische Auswertung

Die Auswertung aller Ergebnisse erfolgte über Lochkarten auf dem Computer des regionalen Hochschulrechenzentrums in Bonn.¹⁾ Die Berechnung der Untersuchungsergebnisse und die für die einzelnen Vergleiche der Ergebnisse angewendeten Tests sind im folgenden aufgezählt (83, 128, 141, 153).

6.1. Berechnungen und Tests mit den Ergebnissen aus Versuch 1 (Ermittlung der Tastfähigkeit mit Prüfkörpern in Joghurt)

- Errechnung der mittleren absoluten Tastfähigkeit aller Probanden über den M e d i a n w e r t

1) Die Software für sämtliche Rechnungen erstellte Herr Dipl. Math. Konrad Oettershagen, Inst. f. Physiologie der Univ. Bonn. Ihm gebührt herzlicher Dank für schnelle und verständliche Hilfe sowie seine Einführung in statistische Probleme, ohne die eine so umfangreiche Auswertung nicht möglich gewesen wäre.

- Abhängigkeit der mittleren absoluten Tastfähigkeit vom Geschlecht

M a n n - W h i t n e y - U - T e s t bei zwei unabhängigen Stichproben für Daten auf Ordinalniveau

- Abhängigkeit der mittleren absoluten Tastfähigkeit vom Alter (Altersgruppen: 10-19, 20-29, 30-39, 40-49, 50-61 Jahre)

a) E i n - W e g - R a n g v a r i a n z a n a l y s e nach Kruskal und Wallis (H-Test) bei mehreren unabhängigen Stichproben für Daten auf Ordinalniveau

b) M a n n - W h i t n e y - U - T e s t zum Vergleich der mittleren absoluten Tastfähigkeit der einzelnen Altersgruppen untereinander

- Abhängigkeit der mittleren absoluten Tastfähigkeit vom Ausmaß der Abgleitbewegung zwischen retraler Kontaktposition und maximaler Interkuspitationsposition (0-0,5; 0,6-1; 1,1-2,5mm)

H - T e s t

- Abhängigkeit der mittleren absoluten Tastfähigkeit von der Art der Zahnführung

a) M a n n - W h i t n e y - U - T e s t für die Gruppen: Eckzahn- und Gruppen-Eckzahn-/Gruppenführung

b) H - T e s t für die Gruppen: Eckzahn- und Gruppen-Eckzahnführung und Gruppenführung

c) U - T e s t zum Vergleich der mittleren absoluten Tastfähigkeit in den einzelnen Zahnführungsgruppen untereinander

- Abhängigkeit der mittleren absoluten Tastfähigkeit vom Tagesrhythmus (Untersuchungszeiten: 8-11, 11-14, 14-18 Uhr)

F r i e d m a n ' s Z w e i - W e g - R a n g v a r i a n z a n a l y s e für mehrere abhängige Stichproben für Daten auf Ordinalniveau

- Abhängigkeit der mittleren absoluten Tastfähigkeit von Übungseffekten; Test der Tastfähigkeit an verschiedenen Tagen unter Berücksichtigung einer möglichen Tagesrhythmik

W i l c o x o n - V o r z e i c h e n r a n g - T e s t für zwei abhängige Stichproben bei Daten auf Ordinalniveau

6. 2. Berechnungen und Tests mit den Ergebnissen aus Versuch 2 (Ermittlung der Tastfähigkeit mit Metallfolien)

6.2.1. Tests zur mittleren absoluten Tastfähigkeit

- Berechnung der mittleren absoluten Tastfähigkeit der Frontzähne, Eckzähne, Prämolaren und Molaren aller Probanden über den Medianwert
- Abhängigkeit der mittleren absoluten Tastfähigkeit aller Zahnarten vom Geschlecht
U - T e s t
- Abhängigkeit der mittleren absoluten Tastfähigkeit aller Zahnarten vom Alter (Altersgruppen: 10-19, 20-29, 30-39, 40-49, 50-61 Jahre)
 - a) H - T e s t zur Entscheidung, ob die mittlere absolute Tastfähigkeit aller Zahnarten in den Altersgruppen aus derselben Population stammt
 - b) U - T e s t zum Vergleich der mittleren absoluten Tastfähigkeit aller Zahnarten in den einzelnen Altersgruppen gegeneinander
- Abhängigkeit der mittleren absoluten Tastfähigkeit aller Zahnarten vom Ausmaß der Abgleitbewegung zwischen retraler Kontaktposition und maximaler Interkuspidationsposition (0-0,5; 0,6-1; 1,1-2,5 mm)
H - T e s t
- Abhängigkeit der mittleren absoluten Tastfähigkeit aller Zahnarten von der Art der Zahnführung
 - a) U - T e s t für die Gruppen: Eckzahn- und Gruppen-Eckzahn-/Gruppenführung
 - b) H - T e s t für die Gruppen: Eckzahn- und Gruppen-Eckzahn- und Gruppenführung
- Abhängigkeit der mittleren absoluten Tastfähigkeit aller Zahnarten vom zahnärztlichen Versorgungszustand
 - a) H - T e s t für die verschiedenen Formen der zahnärztlichen Versorgung (provisorische-/Kunststoff-/Amalgamfüllungen - Inlays/Onlays/Kronen - Brückenzwischenglieder)
 - b) U - T e s t für den Vergleich zwischen unbehandelten und behandelten Zähnen

- Abhängigkeit der mittleren absoluten Tastfähigkeit aller Zahnarten vom Tagesrhythmus (Untersuchungszeiten: 8-11, 11-14, 14-18 Uhr)
 - a) U - T e s t zum Vergleich der Tastfähigkeiten in den einzelnen Zeitgruppen gegeneinander
 - b) H - T e s t zum Vergleich der Tastfähigkeiten in allen Zeitgruppen untereinander
 - Vergleich der mittleren absoluten Tastfähigkeit der einzelnen Zahngruppen untereinander
- U - T e s t

6.2.2. Tests zur 50%-Sensibilität¹⁾

- Errechnung der 'ersten' 50%-Sensibilität²⁾ der Frontzähne, Eckzähne, Prämolaren, Molaren aller Probanden über den Medianwert³⁾
 - Errechnung der 'interpolierten' 50%-Sensibilität²⁾ der Frontzähne, Eckzähne, Prämolaren, Molaren aller Probanden über den Medianwert
 - Abhängigkeit der 50%-Sensibilität aller Zahnarten vom Geschlecht
- U - T e s t

1) Die 50%-Sensibilität gibt die Foliendicke an, bei deren Test ein Proband in 50% der 10 Versuchsdurchgänge (vgl. Kap. 5.3.2.) positive und in 50% der Fälle negative Empfindungen feststellt.

2) Da auf Grund der physiologischen Schwankungsbreite diese 50%-Schwelle mehrfach durchlaufen werden konnte (vgl. Abb. 14 und 18, S. 56 und 60), haben wir den Wert auf zwei Arten berechnet. Zum einen wurde die Foliendicke als 50%-Sensibilität ermittelt, bei der die Probanden das erste Mal die 50%-Grenze durchliefen ('erste' 50%-Sensibilität). Zum anderen wurde der erste Tastwert vor dem ersten sowie der erste Tastwert nach dem letzten Passieren der 50%-Grenze genommen. Die zugehörige Foliendicke wurde dann zwischen diesen beiden Werten interpoliert.

3) Bei der Berechnung wurden die von den Probanden fälschlich als 'positiv' gemeldeten Leerversuche von den bei dieser Folienstärke tatsächlich 'positiven' Tastwerten abgezogen.

- Abhängigkeit der 50%-Sensibilität aller Zahnarten vom Ausmaß
der Abgleitbewegung zwischen retraler Kontaktposition und
maximaler Interkuspidationsposition

H - T e s t

- Abhängigkeit der 50%-Sensibilität aller Zahnarten von den
Altersgruppen

H - T e s t

- Abhängigkeit der 50%-Sensibilität aller Zahnarten von der Art
der Zahnführung

U - T e s t für die Gruppen: Eckzahn- und Gruppen-Eckzahn-/
Gruppenführung

- Abhängigkeit der 50%-Sensibilität aller Zahnarten vom zahn-
ärztlichen Versorgungszustand

H - T e s t für die verschiedenen Formen der zahnärztlichen
Versorgung

- Vergleich der 50%-Sensibilität der einzelnen Zahngruppen
untereinander

a) W i l c o x o n - T e s t

b) U - T e s t

6.2.3. Korrelation zwischen mittlerer absoluter Tastfähigkeit und der 50%-Sensibilität

R a n g k o r r e l a t i o n s k o e f f i z i e n t nach
Spearman als nichtparametrisches Korrelationsmaß für Daten auf
Ordinalniveau.

6.3. Vergleich zwischen den Daten aus Versuch 1 und Versuch 2

- Korrelation zwischen der mittleren absoluten Tastfähigkeit
in Versuch 1 und der mittleren absoluten Tastfähigkeit aller
Zahnarten bei gleichen Tageszeiten

R a n g k o r r e l a t i o n s k o e f f i z i e n t

- Unterschiede zwischen der mittleren absoluten Tastfähigkeit
in Versuch 1 und der mittleren absoluten Tastfähigkeit aller
Zahnarten bei gleichen Tageszeiten

W i l c o x o n - T e s t

- Vergleich der mittleren absoluten Tastfähigkeit der Front- bzw. Seitenzähne aus Versuch 1 mit der mittleren absoluten Tastfähigkeit der Front- bzw. Seitenzähne aus Versuch 2
 χ^2 - T e s t (Vierfeldertafel)

7. Ergebnisse aus Versuch 1

(Prüfung der Tastfähigkeit mit Hilfe von Aluminiumoxid-Körnern in Joghurt)

Bei 109 Versuchspersonen haben wir 297 Versuche und insgesamt ca. 5000 Einzeltests durchgeführt.

48 Probanden des Kollektivs wurden jeweils an einem Tag sowohl morgens, mittags als auch spätnachmittags geprüft. Weitere 24 Personen testeten wir mehrfach an verschiedenen Tagen zu gleichen Tageszeiten. Alle übrigen untersuchten wir nur zweimal an einem Tag oder aber bis zu sieben Mal zu unterschiedlichen Zeiten an verschiedenen Tagen.

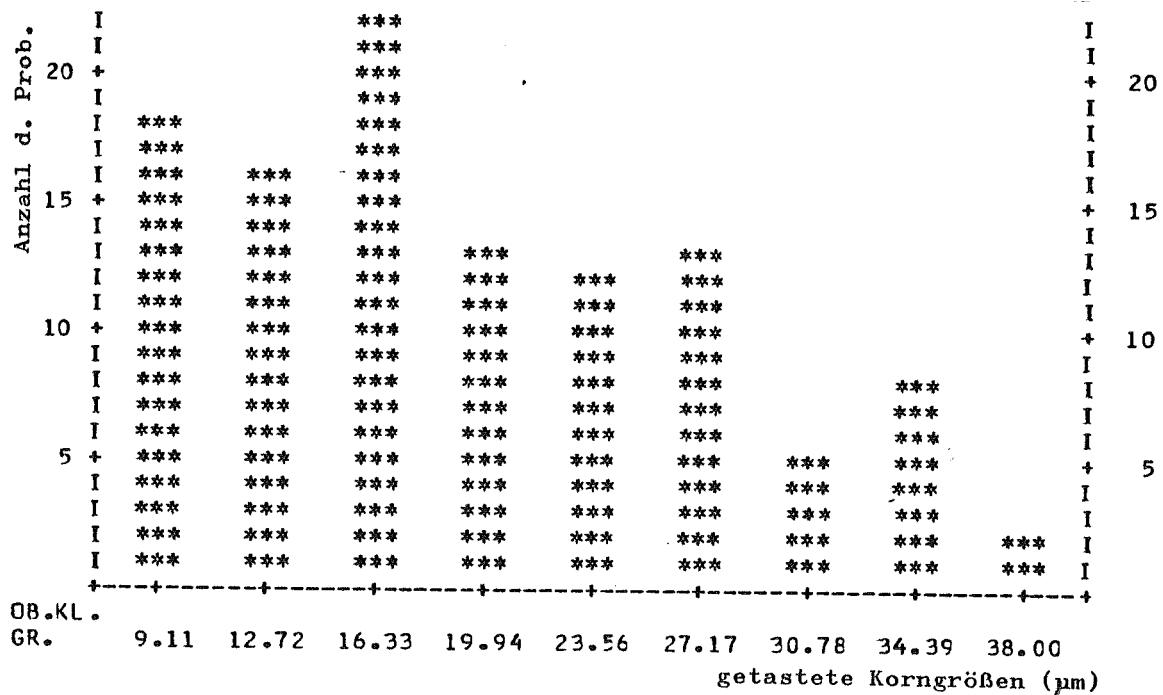
Die Probanden gaben bei der dem Versuch folgenden Befragung 32mal an, die Fremdkörper hauptsächlich mit den Front-, 150mal nur mit den Seitenzähnen und 115mal sowohl mit den Front- als auch mit den Seitenzähnen getastet zu haben.

Die kleinsten Aluminiumoxid-Teilchen, die in der Joghurt von den einzelnen Versuchspersonen erkannt wurden, waren zwischen 5,5 μm und 38 μm groß. Daraus errechnet sich ein Medianwert von 15,2 μm (s. Abb. 8, S. 49).

Der Medianwert der weiblichen Testteilnehmer (19,1 μm) lag deutlich über dem der männlichen Versuchspersonen (14,3 μm ; s. Abb. 9 u. 10, S. 50).

Die Probanden verfeinerten ihre Tastempfindung kontinuierlich im Laufe eines Tages (s. Tab. 12, S. 49).

Daraus könnte man schließen, daß sich die Tastfähigkeit nach einem Biorhythmus verändert. Die Ergebnisse lassen sich jedoch auch mit Übungseffekten erklären (vgl. Kap. 10.1.) Wir führten deshalb einen Nachtest durch, wobei wir davon ausgingen, daß



ANZAHL : 109
MIN. : 5.500
MAX. : 38.000
MEDIAN : 15.200
MITTEL : 17.359
ST.ABW. : 7.796

Abb. 8 VERTEILUNG DER MITTELWERTE DER GERADE NOCH ERTASTETEN
Al₂O₃-KORNGRÖSSEN IM PROBANDENKOLLEKTIV

Tab. 12 TAGESZEITABHÄNGIGKEIT DES TASTVERMÖGENS
(Signifikanz 1%)

Aluminiumoxidkorn-Versuche	Uhrzeit		
	8-11	11-14	14-18
Mittelwerte der absoluten Tastfähigkeit (in µm)	18,7	15,8	12,9

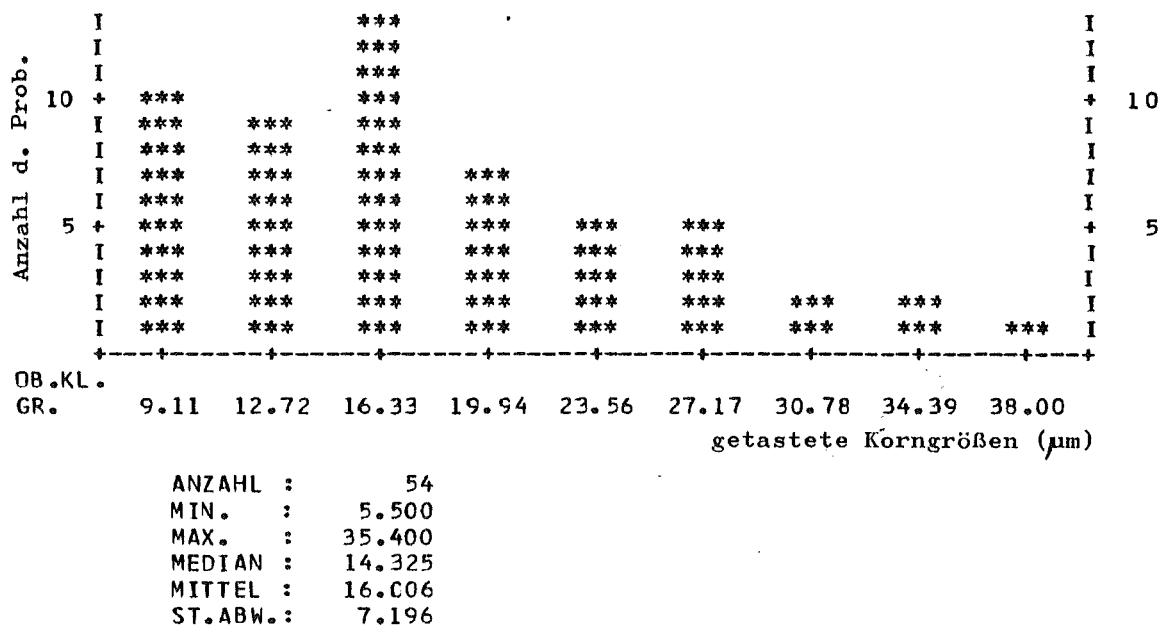


Abb. 9 VERTEILUNG DER MITTELWERTE DER GERADE NOCH ERTASTETEN
Al₂O₃-KORNGROSSEN UND IHRE VERTEILUNG BEI MÄNNLICHEN
PROBÄNDEN

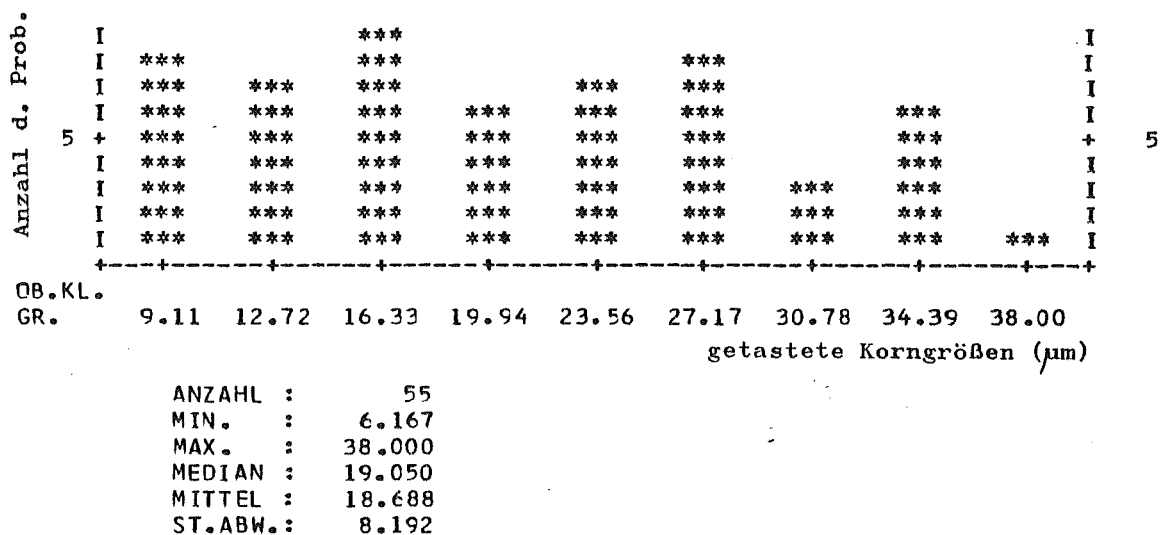


Abb. 10 VERTEILUNG DER MITTELWERTE DER GERADE NOCH ERTASTETEN
Al₂O₃-KORNGROSSEN UND IHRE VERTEILUNG BEI WEIBLICHEN
PROBÄNDEN

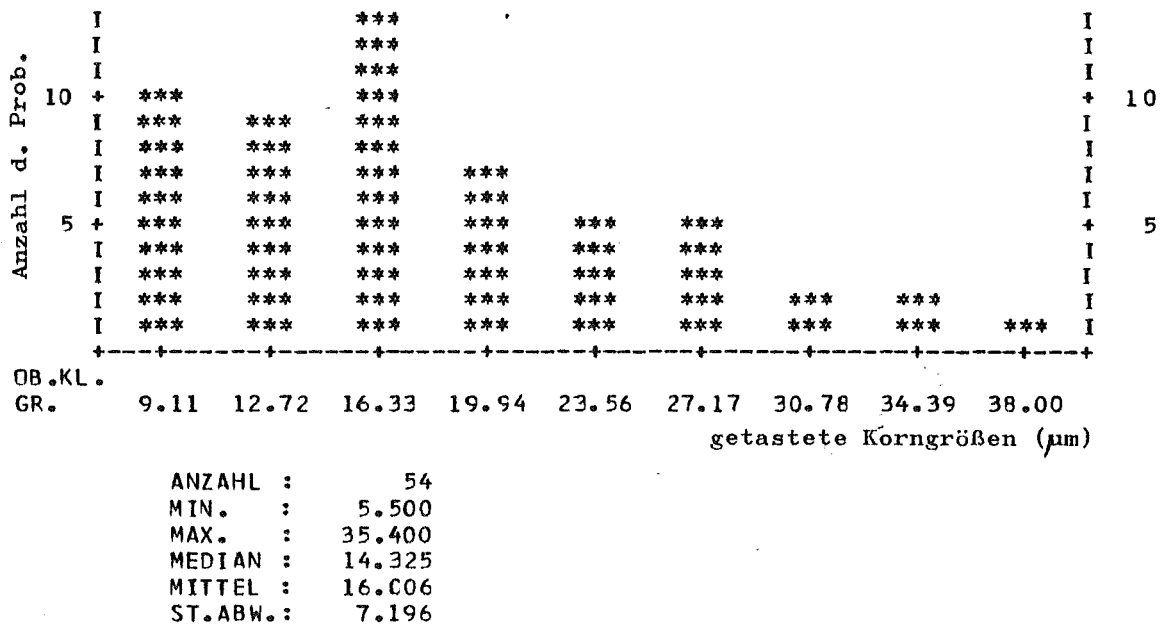


Abb. 9 VERTEILUNG DER MITTELWERTE DER GERADE NOCH ERTASTETEN
Al₂O₃-KORNGROSSEN UND IHRE VERTEILUNG BEI MÄNNLICHEN
PROBANDEN

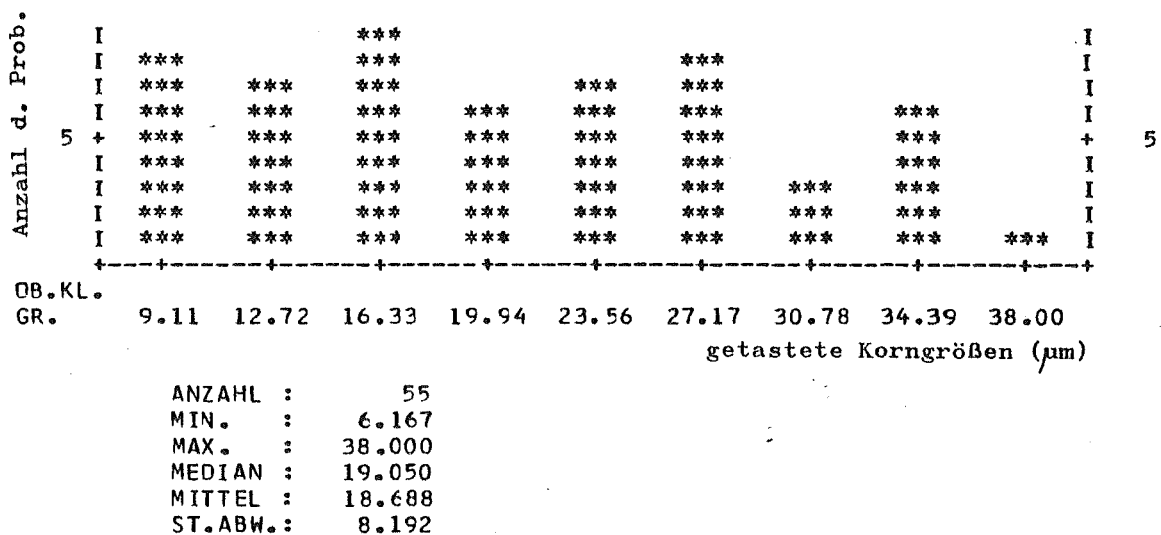


Abb. 10 VERTEILUNG DER MITTELWERTE DER GERADE NOCH ERTASTETEN
Al₂O₃-KORNGROSSEN UND IHRE VERTEILUNG BEI WEIBLICHEN
PROBANDEN

der jeweils erste Test jeder Versuchsperson nicht von Übungseffekten beeinflusst ist. Da die Testserie bei einigen Versuchspersonen zu unterschiedlichen Tageszeiten begann, haben wir diese entsprechenden Ergebnisse verglichen. Der Nachweis einer tageszeitlichen Schwankung der Tastempfindung ließ sich hierbei statistisch nicht führen.

Uns interessierte, ob die Tastfähigkeit über längere Zeit stabil bleibt. Dazu verglichen wir die Mittelwerte von 24 Versuchspersonen zu gleichen Tageszeiten an möglichst weit auseinander liegenden Tagen. Wir hofften dabei auf eine Minimierung evtl. vorhandener Übungseffekte. Die sich ergebenden Mittelwerte sind aus Tab. 13 zu entnehmen.

Tab. 13 ÄNDERUNG DES TASTVERMÖGENS AN VERSCHIEDENEN TAGEN
(Signifikanz $< 5\%$)

Aluminiumoxidkorn-Versuche	1. Test	2. Test
Mittelwerte der absoluten Tastfähigkeit (in μm)	16,8	14,4

Wir gehen davon aus, daß die minimale Tastfähigkeit nicht unter einen gewissen Wert sinken kann. Dies bedeutet aber, daß u. U. vorhandene Übungseffekte sich besonders in den ersten Tests einer Versuchsperson auswirken müßten. Wir verglichen deshalb zusätzlich die beiden letzten Tests jeweils eines Probanden, die zu gleicher Tageszeit durchgeführt wurden. Statistisch ließ sich ein Unterschied zwischen den entsprechenden Mittelwerten nicht mehr finden. Die zunächst festgestellte Verbesserung der Tastfähigkeit im Laufe der Zeit dürfte deshalb Übungsbedingt sein.

Wir konnten keine statistischen Zusammenhänge zwischen der minimalen Tastempfindung und dem Alter, der Zahnführung und der Größe der Abgleitbewegung zwischen retraler Kontaktposition und maximaler Interkuspidation feststellen.

8. Ergebnisse aus Versuch 2

(Prüfung der Tastfähigkeit mit Kupferfolien zwischen antagonistischen Zahnpaaren)

Bei 73 Probanden, die auch an Versuch 1 teilnahmen, haben wir 277 antagonistische Zahnpaare geprüft. Dazu waren ca. 66 500 Einzeltests nötig.

8.1. Tastfähigkeit der Frontzähne

Die dünnsten Folien, die beim Test von den einzelnen Versuchspersonen zwischen den Frontzähnen erkannt wurden, hatten eine Stärke zwischen $3\text{ }\mu\text{m}$ und $34\text{ }\mu\text{m}$ bei einem Medianwert von $10,0\text{ }\mu\text{m}$ (s. Abb. 11, S. 53).

Eine statistische Abhängigkeit der Mittelwerte von Geschlecht, Alter, Tageszeit, Art der zahnärztlichen Restaurationen sowie der Größe der Abgleitbewegung zwischen retraler Kontaktposition (RKP) und maximaler Interkuspitation (MIK) ließ sich nicht nachweisen. Dagegen lag die Tastempfindlichkeit für Probanden mit einer Eckzahnführung niedriger ($9\text{ }\mu\text{m} \pm 2,8\text{ }\mu\text{m}$) als für solche mit einer Gruppen-Eckzahnführung ($16\text{ }\mu\text{m} \pm 9,7\text{ }\mu\text{m}$; Signifikanz = 5%, S. Tab. 14, S. 54).

Die Berechnung der 50%-Sensibilität¹⁾ der Frontzähne führte zu Werten zwischen $1,5\text{ }\mu\text{m}$ und $253,8\text{ }\mu\text{m}$ mit einem Median von $28,6\text{ }\mu\text{m}$ (s. Abb. 12 u. 13, S. 55, 56). Ein Beispiel für einen individuellen Test bietet Abb. 14, S. 56).

1) Die Berechnung der 'ersten' 50%-Sensibilität führte zu teilweise deutlich niedrigeren Test-Werten als die 'interpolierte' 50%-Sensibilität (vgl. Fußnote 2), S. 46). Da bis auf eine Ausnahme alle statistischen Tests (durchgeführt sowohl mit Werten der 'ersten' 50%-Sensibilität als auch mit Werten der 'interpolierten' 50%-Sensibilität) im Ergebnis keine qualitativen Unterschiede für die von uns untersuchten Parameter erbrachten, veröffentlichen wir im folgenden die Werte der auch in der bisherigen Literatur benutzten 'interpolierten' 50%-Sensibilität. Ergebnisse, die der 'ersten' 50%-Sensibilität entsprechen, kennzeichnen wir besonders. Wir machen jedoch darauf aufmerksam, daß es je nach Definition der 50%-Schwelle zu deutlich unterschiedlichen Werten kommt. Die 'interpolierte' 50%-Sensibilität ziehen wir insgesamt vor, da diese statistisch sicherere Werte beinhaltet.

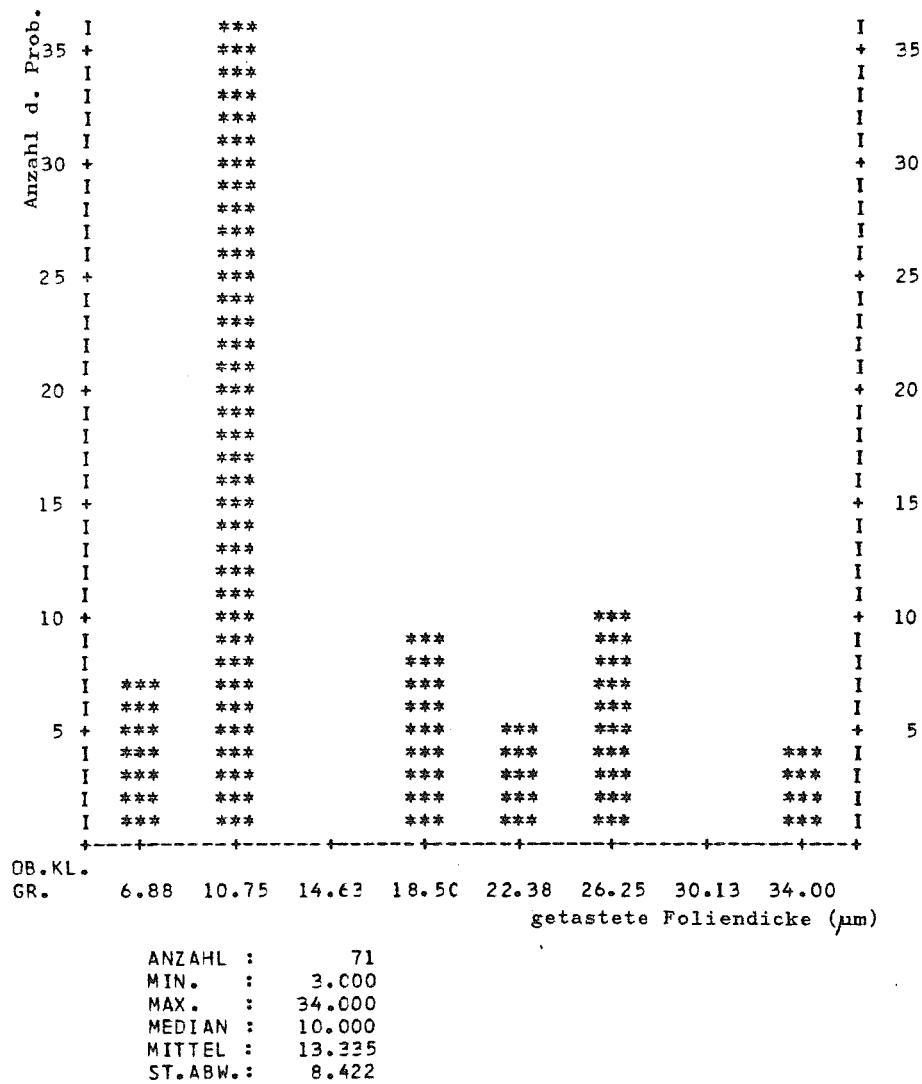


Abb. 11 VERTEILUNG DER MITTELWERTE DER GERADE NOCH ZWISCHEN
DEN FRONTZÄHNEN ERTASTETEN KUPFERFOLIEN IM PROBANDEN-
KOLLEKTIV

Tab. 14 TASTFÄHIGKEIT IN ABHÄNGIGKEIT VON DER ZAHNFÜHRUNG
(Medianwerte in μm , gerundet)

Folienversuche	Frontzähne			Eckzähne			Prämolaren			Molaren		
	Eckzahnführung	Gruppenführung	Gruppen-Eckzahnführung	Eckzahnführung	Gruppenführung	Gruppen-Eckzahnführung	Eckzahnführung	Gruppenführung	Gruppen-Eckzahnführung	Eckzahnführung	Gruppenführung	Gruppen-Eckzahnführung
absolute Schwelle	8	10	15	15	20	34	8	10	15	9	10	15
Signifikanz	↕ = 5% ↗			↕ < 5% ↗			↕ = 5% ↗			-		
50%-Schwelle	18	31		50	64		21	17		15		16
Signifikanz	< 5%			-			-			-		

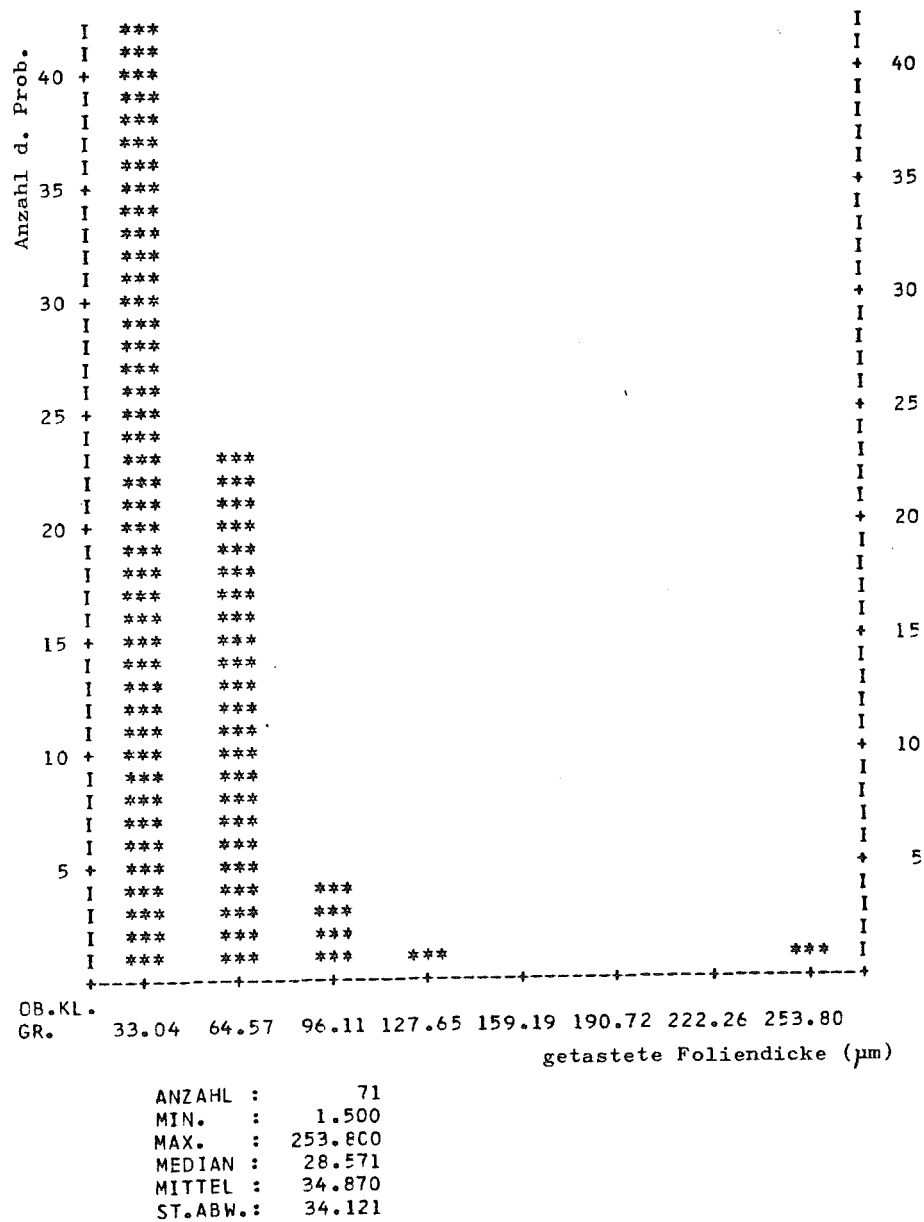


Abb. 12 VERTEILUNG DER MITTELWERTE DER 50%-SENSIBILITÄT DER FRONTZÄHNE IM PROBANDENKOLLEKTIV

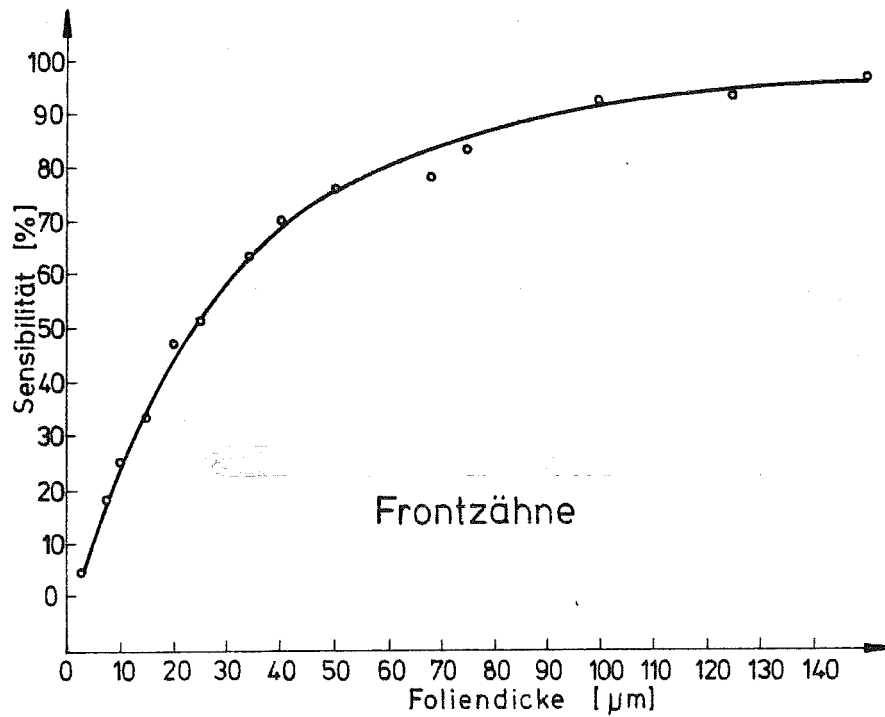


Abb. 13 DIE MITTLERE %-SENSIBILITÄT DER FRONTZÄHNE IM PROBANDENKOLLEKTIV

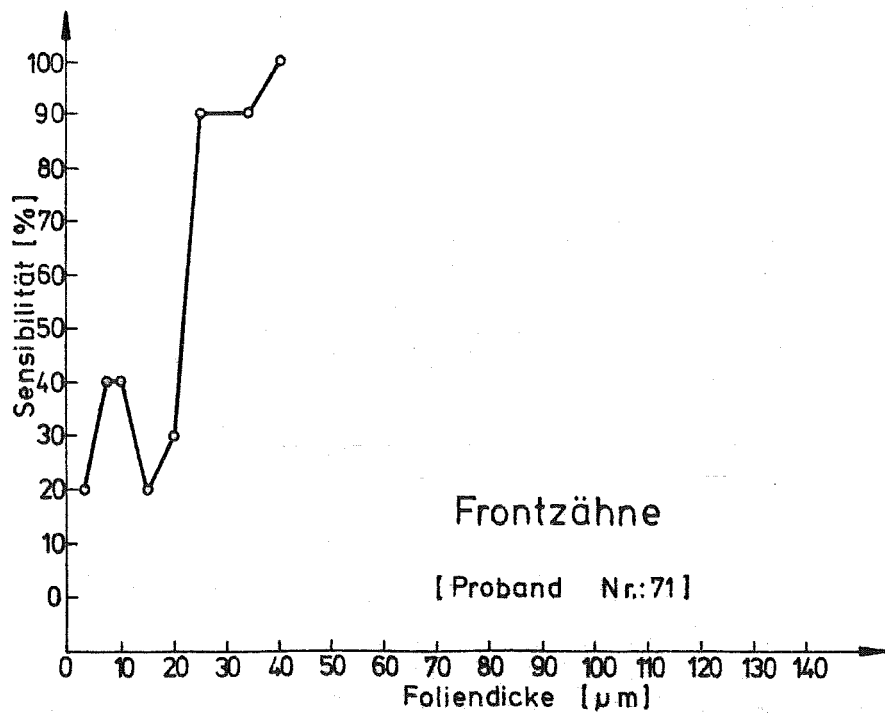


Abb. 14 %-SENSIBILITÄT DER FRONTZÄHNE DES PROBANDEN NR. 71

Probanden mit einer Eckzahnführung tasteten auch hier geringere Werte ($17,8 \mu\text{m} \pm 7,9 \mu\text{m}$) als solche mit einer Gruppen- bzw. Gruppen-Eckzahnführung ($33,3 \mu\text{m} \pm 22,4 \mu\text{m}$; vgl. Tab. 14, S. 54). Die Abhängigkeit der 50%-Sensibilität von Geschlecht, Alter, Tageszeit, Art der zahnärztlichen Restaurationen und der Größe der Abgleitbewegung zwischen RKP und MIK ließ sich ebenfalls nicht nachweisen.

8.2. Tastfähigkeit der Eckzähne

Die Stärke der dünnsten Folien, die zwischen den Eckzähnen erkannt wurden, lag zwischen $3 \mu\text{m}$ und $150 \mu\text{m}$ bei einem Medianwert von $20,0 \mu\text{m}$ (s. Abb. 15, S. 58).

Einen Einfluß von Geschlecht, Alter, Tageszeit und der Abgleitbewegung zwischen RKP und MIK konnten wir nicht zeigen. Probanden mit einer Eckzahnführung kamen jedoch zu besseren Tastwerten (Median $15 \mu\text{m}$) als solche mit einer Gruppen- (Median $20 \mu\text{m}$) bzw. Gruppen-Eckzahnführung (Median $34 \mu\text{m}$; vgl. Tab. 14, S. 54).

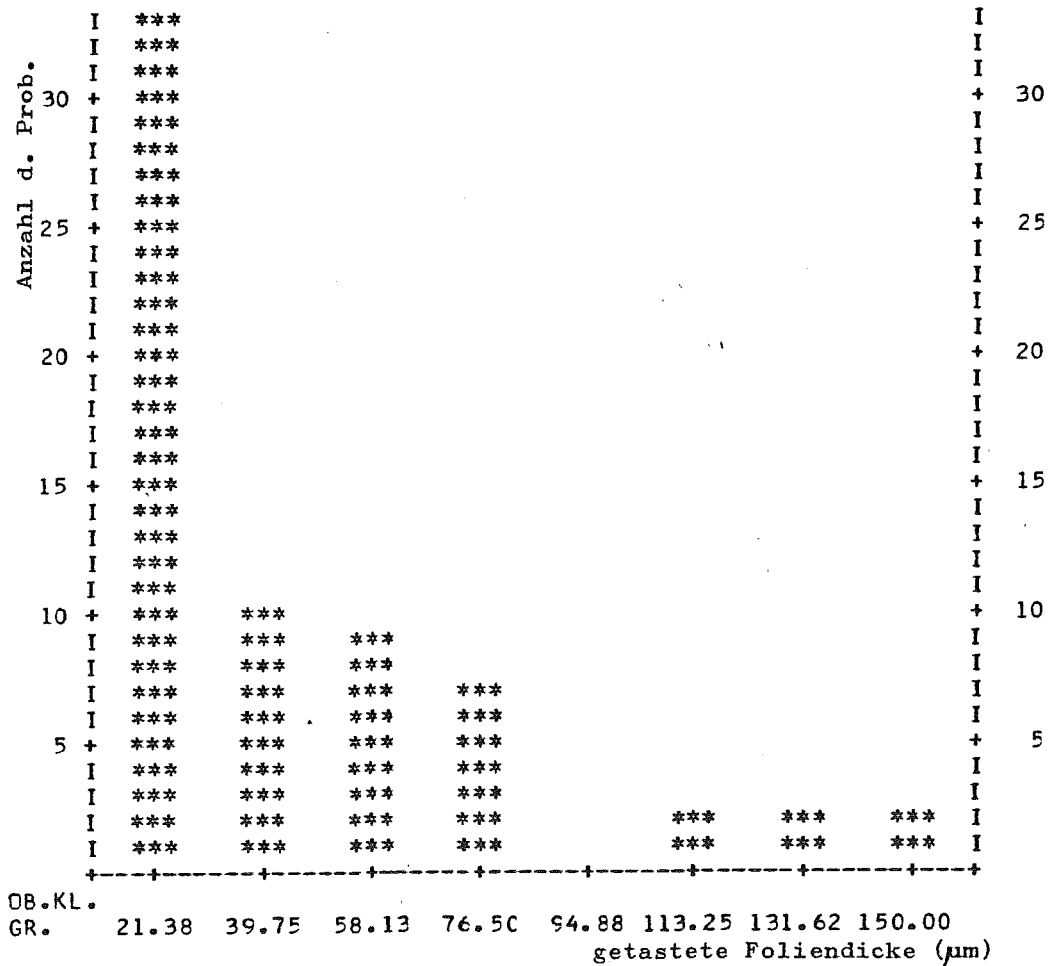
Die 50%-Sensibilität der Eckzähne lag zwischen $1,5 \mu\text{m}$ und $425 \mu\text{m}$ bei einem Median von $63,3 \mu\text{m}$ (s. Abb. 16 u. 17, S. 59). Abb. 18 (S. 60) zeigt den individuellen Testverlauf bei Proband Nr. 66.

Hier ließen sich die anderen von uns berücksichtigten möglichen Einflüsse statistisch nicht absichern.

8.3. Tastfähigkeit der Prämolaren

Aus dem Test der Prämolaren gingen als dünnste Folien solche zwischen $3 \mu\text{m}$ bis $25 \mu\text{m}$ hervor. Der Medianwert belief sich auf $10,0 \mu\text{m}$ (s. Abb. 19, S. 60).

Wir konnten nicht nachweisen, daß die Werte durch Geschlecht, Alter, Tageszeit und Abgleitbewegung zwischen RKP und MIK verändert wurden. An der Grenze der statistischen Nachweisbarkeit lag eine Abhängigkeit des Tastempfindens von einer Eckzahnführung ($10,4 \mu\text{m} \pm 6,8 \mu\text{m}$) bzw. einer Gruppen-Eckzahnführung ($14,2 \mu\text{m} \pm 5,9 \mu\text{m}$; vgl. Tab. 14, S. 54).



ANZAHL : 65
MIN. : 3.000
MAX. : 150.000
MEDIAN : 20.000
MITTEL : 36.089
ST.ABW.: 35.647

Abb. 15 VERTEILUNG DER MITTELWERTE DER GERADE NOCH ZWISCHEN DEN ECKZÄHNEN ERTASTETEN KUPFERFOLIEN IM PROBANDENKOLLEKTIV

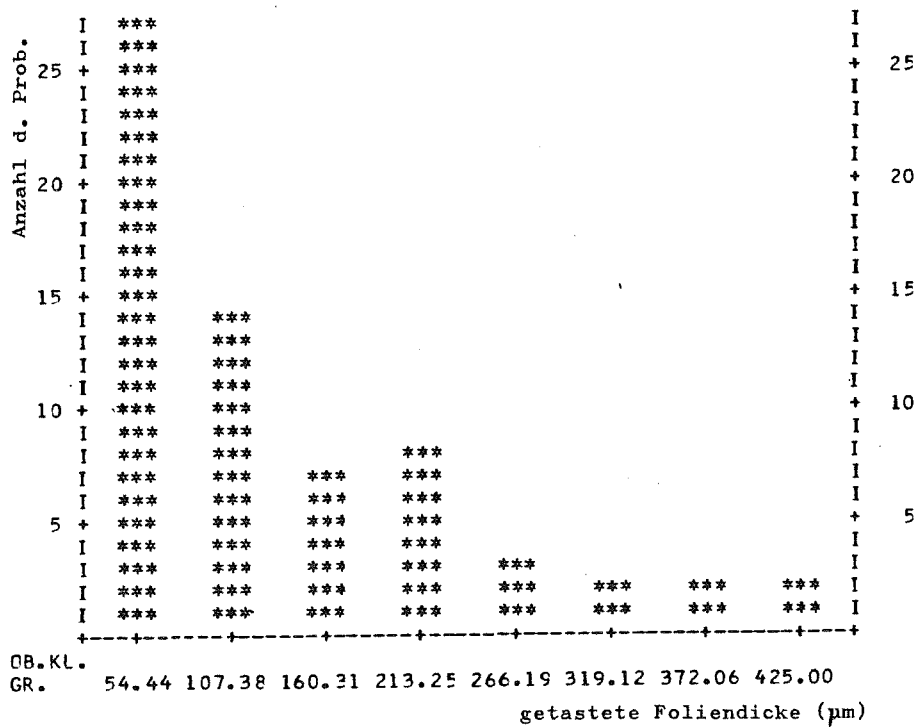


Abb. 16 VERTEILUNG DER MITTELWERTE DER 50%-SENSIBILITÄT DER ECKZÄHNE IM PROBANDENKOLLEKTIV

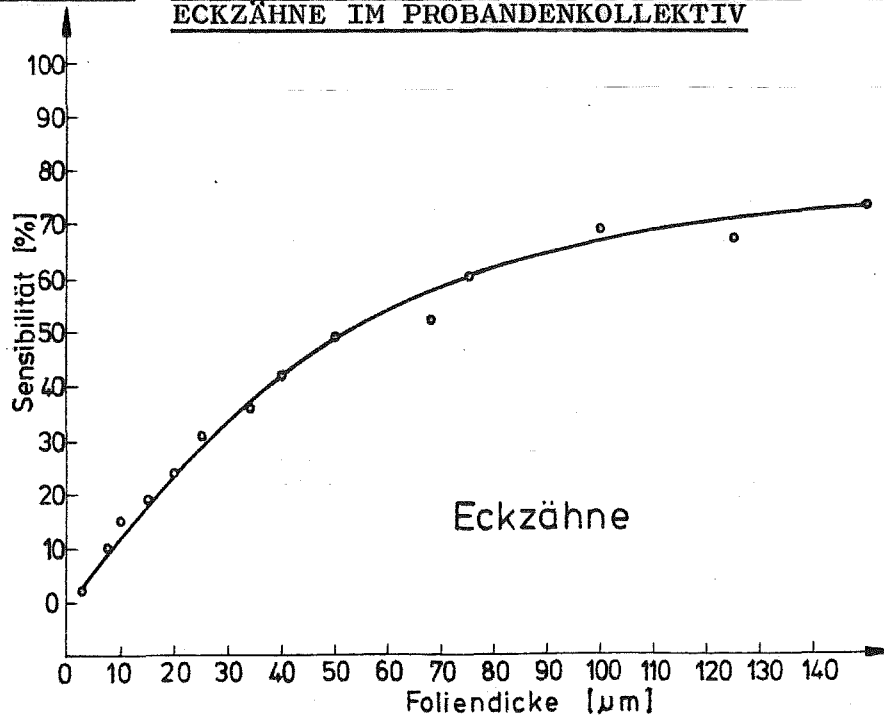


Abb. 17 DIE MITTLERE %-SENSIBILITÄT DER ECKZÄHNE IM PROBANDENKOLLEKTIV

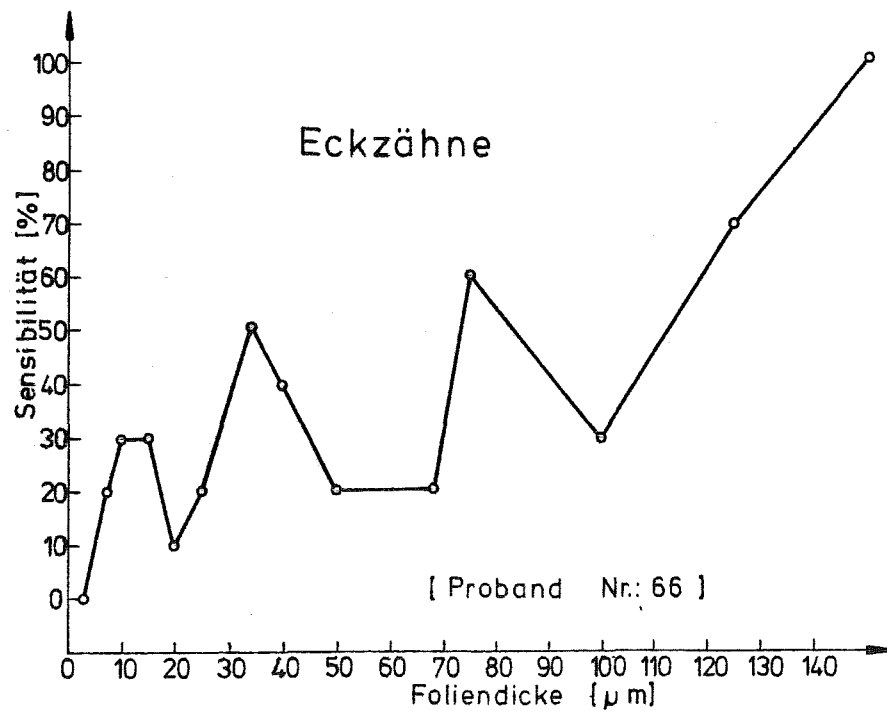


Abb. 18 %-SENSIBILITÄT DER ECKZÄHNE DES PROBANDEN NR. 66

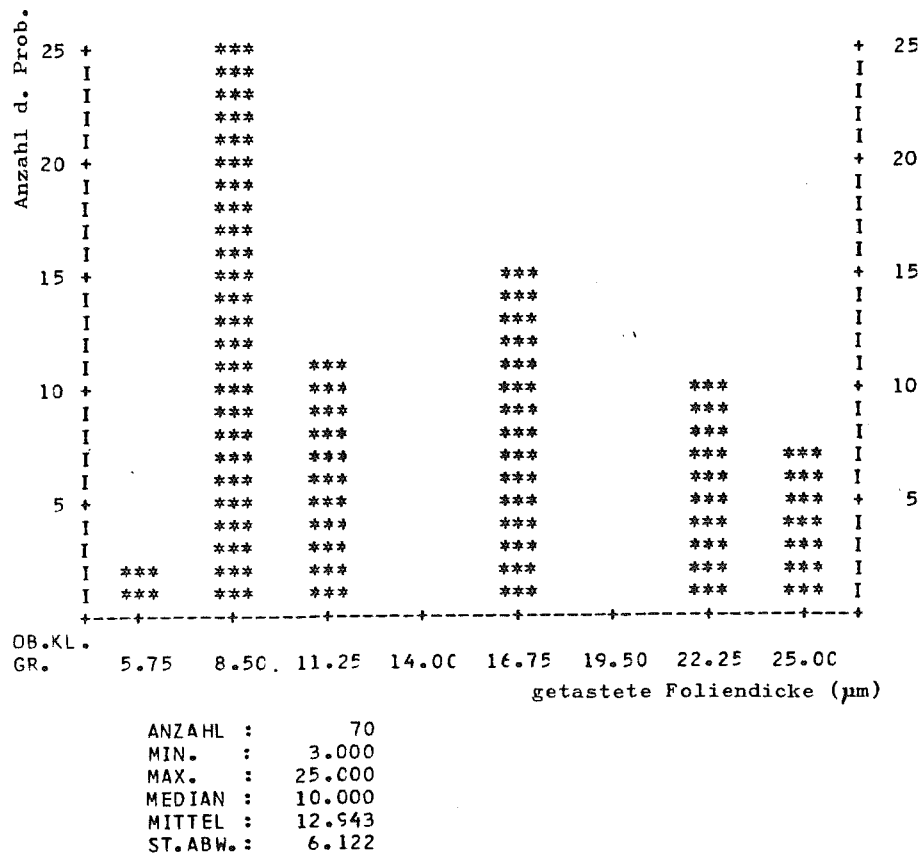


Abb. 19 VERTEILUNG DER MITTELWERTE DER GERADE NOCH ZWISCHEN DEN PRÄMOLAREN ERTASTETEN KUPFERFOLIEN IM PROBANDENKOLLEKTIV

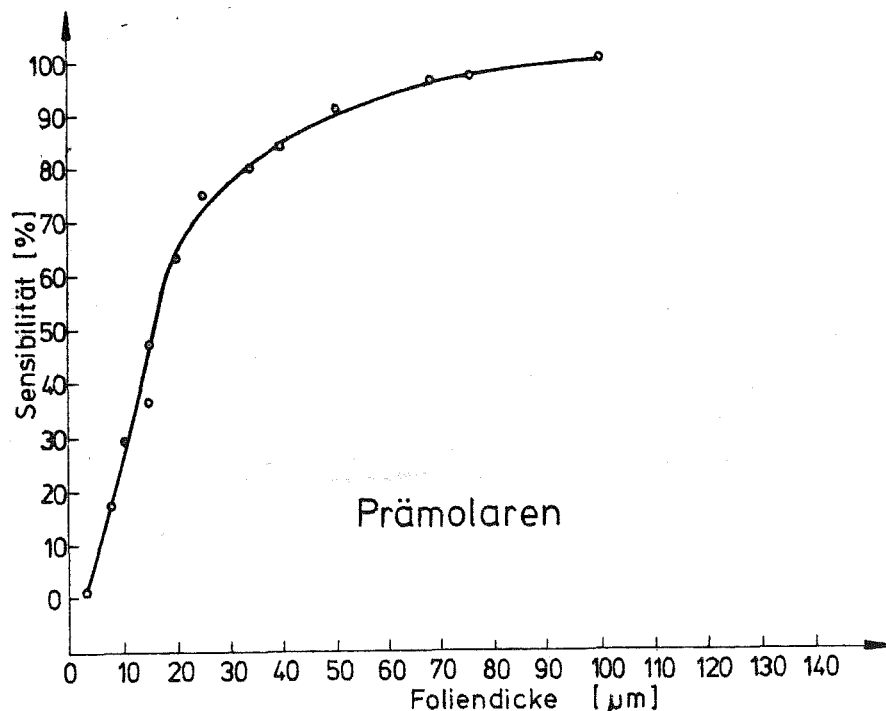


Abb. 21 MITTLERE %-SENSIBILITÄT DER PRÄMOLAREN IM PROBANDEN-
KOLLEKTIV

8.4. Tastfähigkeit der Molaren

Die Stärke der dünnsten Folien, die von den Probanden getastet wurde, lag zwischen 3 µm und 25 µm. Der Medianwert betrug 10 µm (s. Abb. 22, S. 63).

Die 50%-Sensibilität betrug 5,3 µm bis 100 µm bei einem Medianwert von 16,5 µm (s. Abb. 23 u. 24, S. 64 u. 65). Ein Beispiel für einen individuellen Test zeigt in Abb. 25 (S. 65) die Testfolge für Proband Nr. 105.

Geschlecht, Alter, Tageszeit, Abgleitbewegung zwischen MIK und RKP sowie der Art der Zahnführung ließen sich in ihrem Einfluß statistisch weder bei den 'dünnsten Folien' noch für die 50%-Sensibilität darstellen.

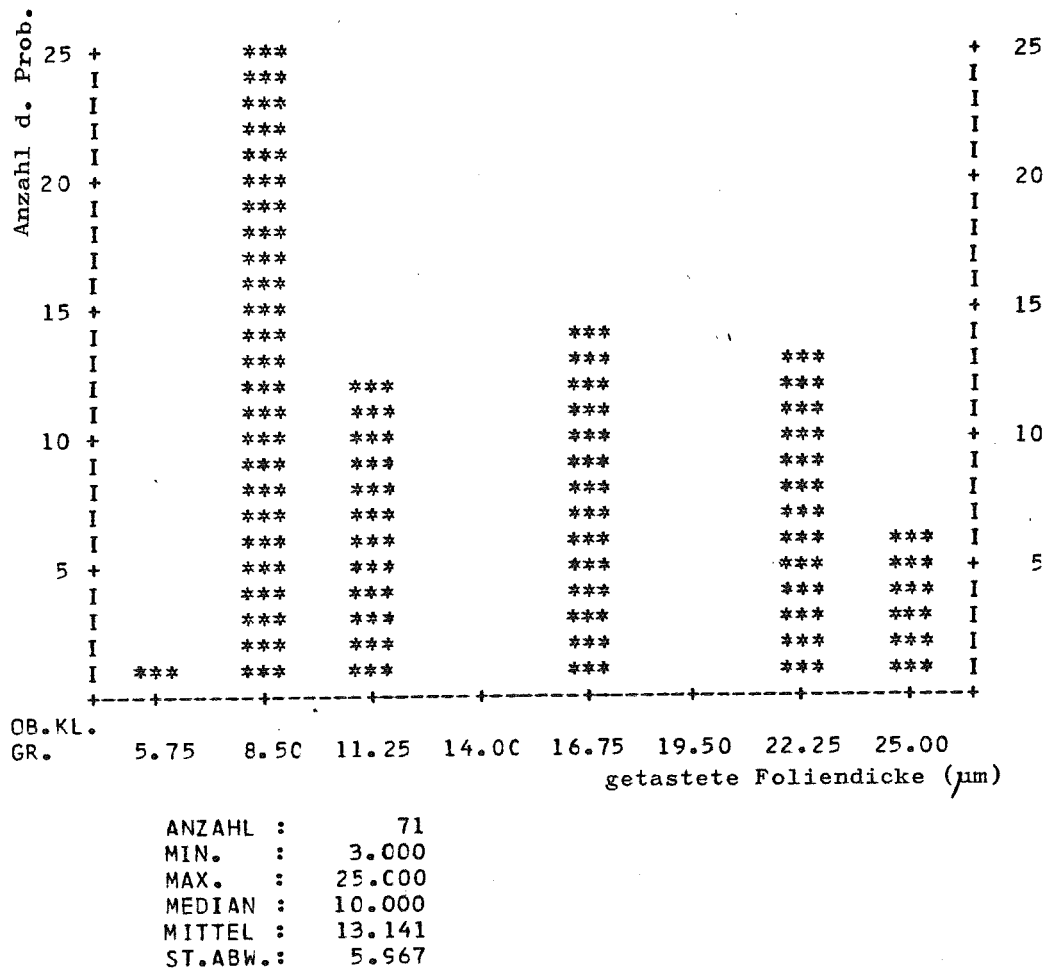
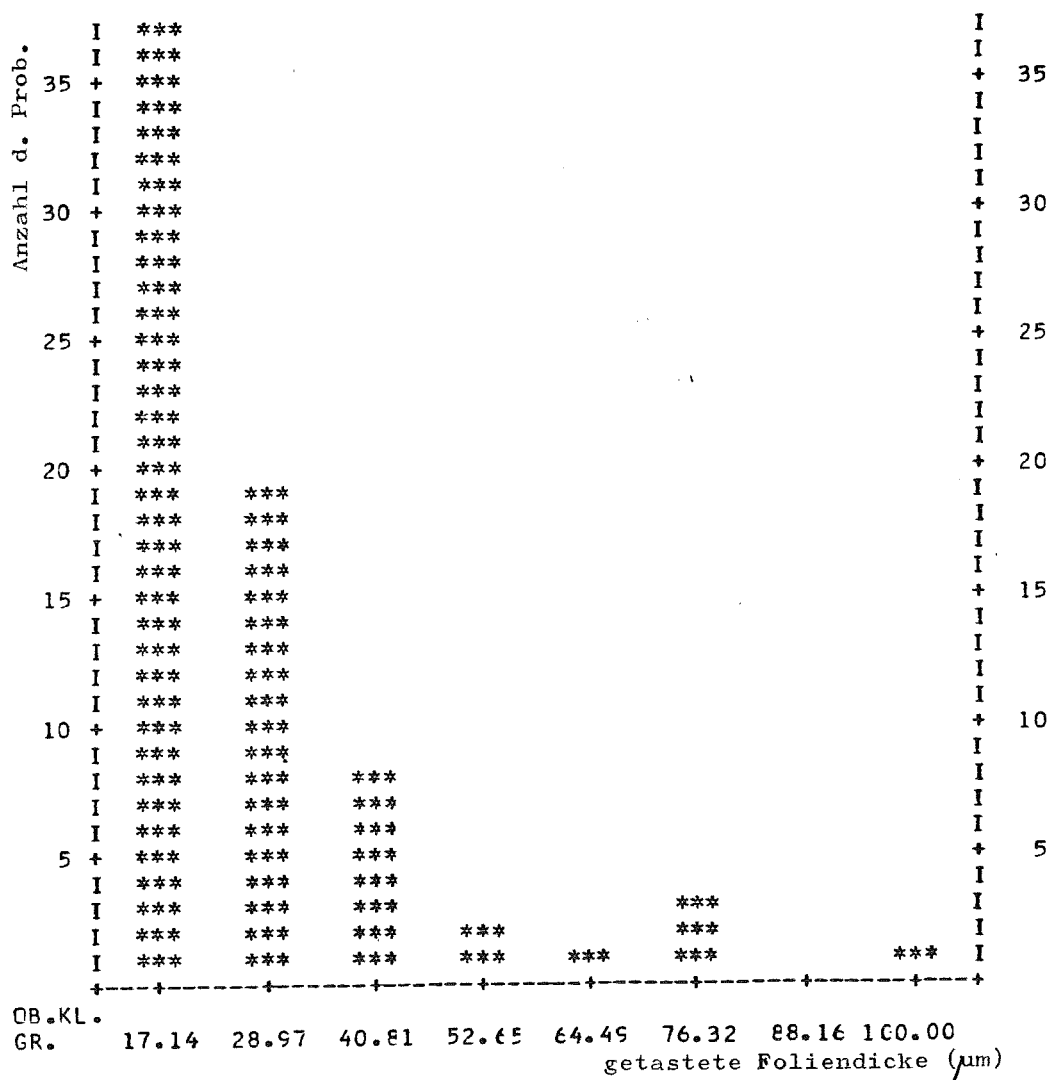


Abb. 22 VERTEILUNG DER MITTELWERTE DER GERADE NOCH ZWISCHEN
DEN MOLAREN ERTASTETEN KUPFERFOLIEN IM PROBANDEN-
KOLLEKTIV



ANZAHL : 71
 MIN. : 5.300
 MAX. : 100.000
 MEDIAN : 16.457
 MITTEL : 21.858
 ST.ABW.: 17.159

Abb. 23 VERTEILUNG DER MITTELWERTE DER 50%-SENSIBILITÄT DER MOLAREN IM PROBANDENKOLLEKTIV

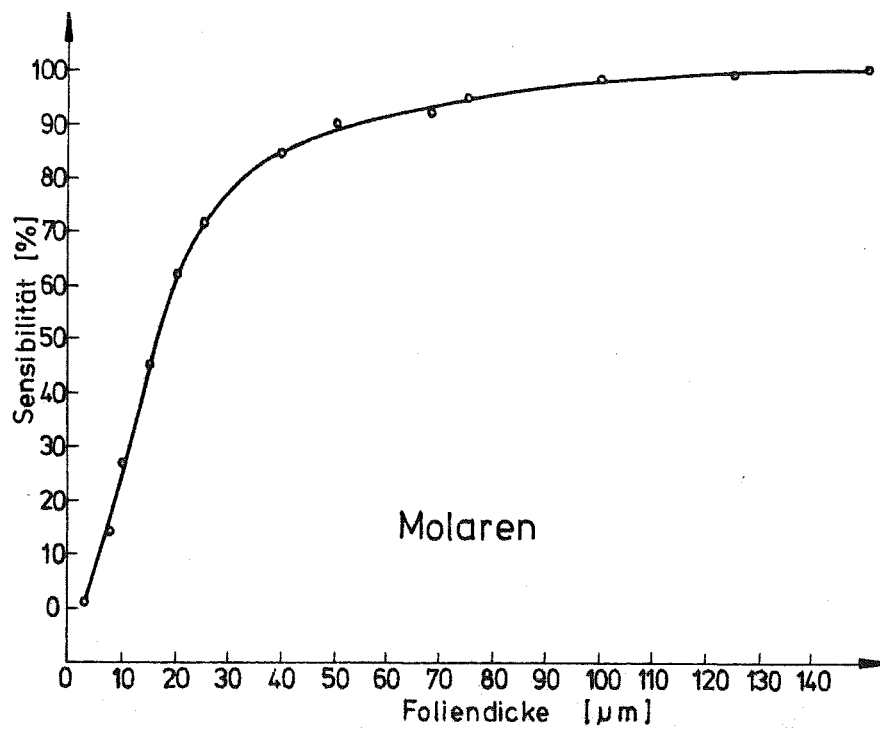


Abb. 24 MITTLERE %-SENSIBILITÄT DER MOLAREN IM PROBANDENKOLLEKTIV

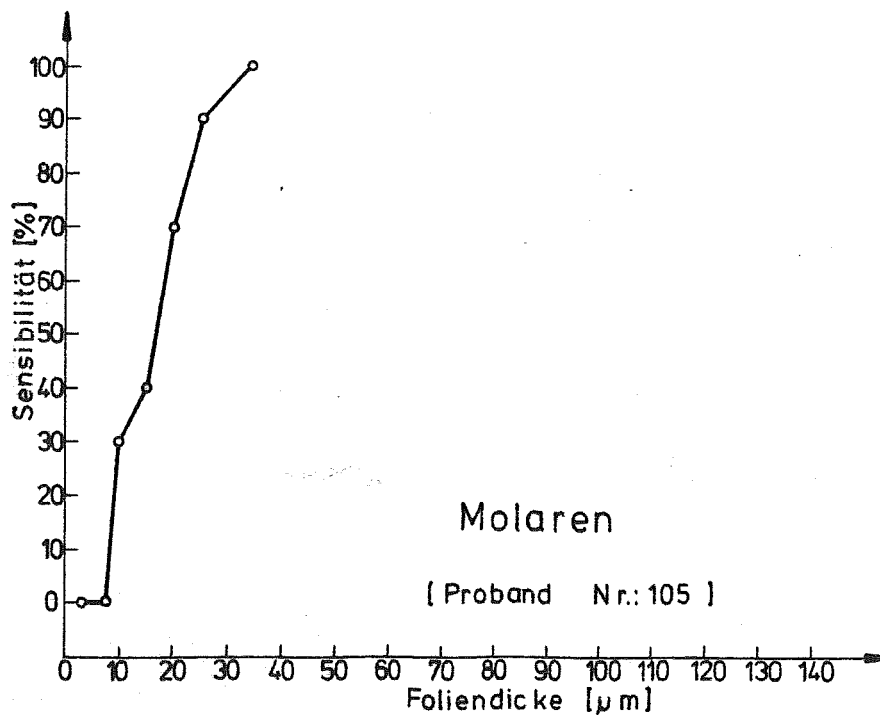


Abb. 25 %-SENSIBILITÄT DER MOLAREN DES PROBANDEN Nr. 105

8.5. Vergleich zwischen den Tastempfindungen der Front-, Eckzähne, Prämolaren und Molaren

Zum Vergleich der Tastfähigkeit der Front-, Eckzähne, Prämolaren und Molaren haben wir zunächst die Mittelwerte aller Probanden für die dünnsten, gerade noch erkannten Folien untersucht (= absolute Tastschwelle). Dabei war das Tastvermögen der Eckzähne deutlich schlechter (Signifikanz $<1\%$) als das aller anderen Zahnarten (s. Tab. 15).

Tab. 15 VERGLEICH DER TASTFÄHIGKEIT DER EINZELNEN ZAHNGRUPPEN
(Werte gerundet)

Folienversuche		Frontzähne μm	Eckzähne μm	Prämolaren μm	Molaren μm
absolute Sensibilität	Bereich	3-34	3-150	3-25	3-25
	Mittelw./Standardabweich.	13 \pm 8	36 \pm 36	13 \pm 6	13 \pm 6
	Median	10	20	10	10
'erste' 50%-Sensibilität*	Bereich	1-73	2-375	1-64	5-71
	Mittelw./Standardabweich.	22 \pm 16	62 \pm 72	17 \pm 11	20 \pm 15
	Median	18	38	14	15
'interpolierte' 50%-Sensibilität	Bereich	2-254	2-425	1-79	5-100
	Mittelw./Standardabweich.	35 \pm 34	108 \pm 101	21 \pm 14	22 \pm 17
	Median	29	63	17	17

*Diese Ergebnisse wurden um die Extremwerte bereinigt.

Auf der Basis der 'interpolierten' 50%-Sensibilität (vgl. Fußnote 2) S. 46) führten wir den Wilcoxon-Test durch. Differenzen in der Tastfähigkeit beim einzelnen Individuum zwischen den Prämolaren und Molaren konnten wir nicht finden. Jedoch unter-

scheiden sich die Tastempfindlichkeiten der Front- wie der Eckzähne hochsignifikant ($<1\%$) von den Prämolaren und Molaren (vgl. Tab. 15, S. 66, Abb. 26); die signifikanten Unterschiede in der Tastempfindung gelten auch für den Vergleich zwischen Front- und Eckzähnen.

Den U-Test benutzten wir, um die Werte der 'ersten' 50%-Sensibilität (vgl. Fußnote 2), S. 46) der einzelnen Zahngruppen gegen-

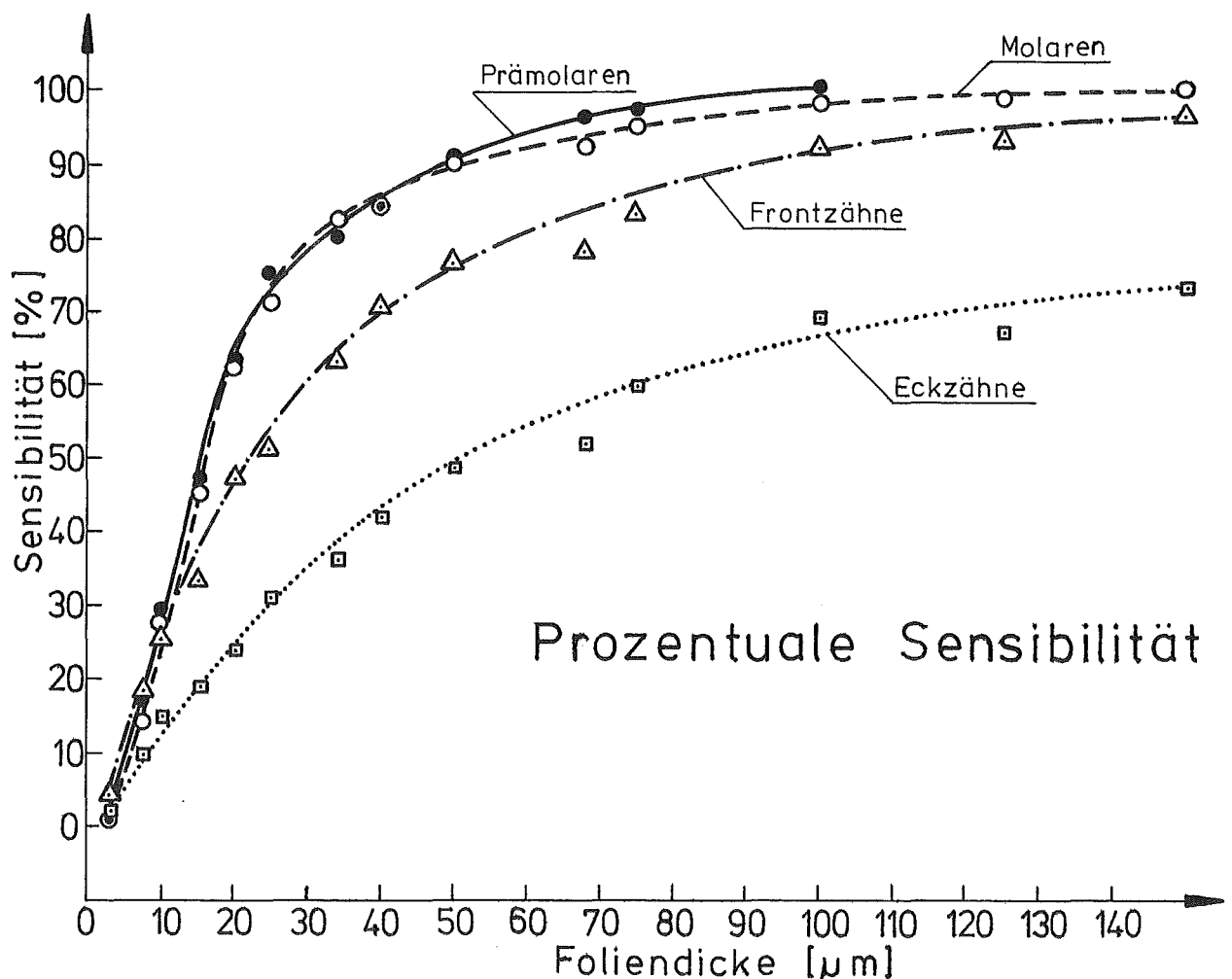


Abb. 26 MITTLERE %-SENSIBILITÄT DER FRONTZÄHNE, ECKZÄHNE, PRÄMOLAREN UND MOLAREN IM PROBANDENKOLLEKTIV

überzustellen. Hierbei unterscheiden sich die Frontzähne, Prämolaren und Molaren hochsignifikant ($<1\%$) von den Eckzähnen. Der Unterschied zwischen den Front- und Seitenzähnen war nicht mehr nachweisbar (vgl. Tab. 15, S. 66).

8.6. Untersuchung der Korrelation zwischen absoluter Tastfähigkeit und der 50%-Sensibilität

Um festzustellen, ob es einen Zusammenhang zwischen der geringsten, von einem Probanden gerade eben noch getasteten Folienstärke einer Zahnart und der jeweiligen 50%-Sensibilität gibt, benutzten wir den Rangkorrelationskoeffizienten. Dabei ließ sich eine sehr deutliche statistische Abhängigkeit beider Werte nachweisen (s. Tab. 16). Wir führten deshalb die meisten Tests

Tab. 16 KORRELATION ZWISCHEN DER ABSOLUTEN TASTFÄHIGKEIT UND DER 50%-SENSIBILITÄT BEI DEN WERTEN AUS VERSUCH 2

Folienversuche	Frontzähne	Eckzähne	Prämolaren	Molaren
Anzahl der Probanden	71	65	70	71
Korrelationskoeffizient	0,65	0,66	0,71	0,79
Signifikanz	$<1\%$	$<1\%$	$<1\%$	$<1\%$

nur mit den Mittelwerten der absoluten Tastfähigkeit durch.

8.7. Vergleich der Tastfähigkeit zahnärztlich behandelter und unbehandelter Zähne

Zur Kontrolle des Einflusses zahnärztlicher Restaurationen auf das Tastvermögen haben wir behandelte mit unbehandelten Zähnen verglichen. Zu den behandelten Zähnen zählten: Zähne mit provisorischen und endgültigen Füllungen, Gußfüllungen, Kronen und Brückenzwischengliedern. Dabei waren Unterschiede zwischen den Mittelwerten der absoluten Tastfähigkeit behandelter und

unbehandelter Frontzähne und der Molaren statistisch signifikant ($<5\%$). Die unbehandelten Frontzähne und Molaren zeigten somit ein feineres Tastvermögen. Dagegen war die Tastempfindung bei behandelten sowie unbehandelten Eckzähnen und Prämolaren gleich (s. Tab. 17).

Tab. 17 VERGLEICH DER ABSOLUTEN TASTEMPFINDEUNG (MEDIANWERTE)
BEI ZAHNÄRZTLICH BEHANDELTEN UND UNBEHANDELTEN ZÄHNEN

Folienversuche	Frontzähne		Eckzähne		Prämolaren		Molaren	
	An- zahl	Median μm	An- zahl	Median μm	An- zahl	Median μm	An- zahl	Median μm
unbehandelte Zähne	55	10	54	25	24	10	8	7,6
behandelte Zähne	15	20	11	15	40	10	49	10
Signifikanz	$<5\%$		-		-		$<5\%$	

9. Vergleich der Ergebnisse der Versuche 1 und 2

(absolute Tastempfindlichkeit bei Aluminiumoxid-Körnern und bei Kupferfolien)

Für einen Vergleich der Ergebnisse zwischen den Versuchen 1 und 2 haben wir verschiedene statistische Tests angewendet. Wir stellten jeweils alle Tastresultate des Versuchs 1 (Aluminiumoxid) denen der einzelnen Zahnarten aus Versuch 2 (Kupferfolien) gegenüber (s. Tab. 18, S. 70). Dabei wollten wir zunächst klären, ob ein Proband mit einer sehr feinen Tastempfindlichkeit in Versuch 1 (= kleiner Meßwert) diese auch in Versuch 2 bestätigt (ebenfalls kleiner Meßwert). Mit Hilfe des Rangkorrelationskoeffizienten konnten wir nur eine Abhängigkeit zwischen den Tastergebnissen aus Versuch 1 und denen der Frontzähne in Versuch 2 herstellen (s. Tab. 19, S. 70).

Einerseits liegen zwar die Gesamtergebnisse der Versuche 1 und 2 zahlenmäßig dicht zusammen, andererseits zeigt sich eine statistische Übereinstimmung der absoluten Tastempfindlichkeiten

Tab. 18 GEGENÜBERSTELLUNG DER ERGEBNISSE AUS DEN VERSUCHEN 1 UND 2

(Werte gerundet)

Vergleich Versuch 1 mit Versuch 2		Tastfähigkeit in μm			
		Frontzähne	Eckzähne	Prämolaren	Molaren
Alumi- nium- oxid- Körner	Bereich	6 - 38			
	Mittel- wert	17 \pm 8			
	Median	15			
Kupfer- folien	Bereich	3 - 34	3 - 150	3 - 25	3 - 25
	Mittel- wert	13 \pm 8	36 \pm 36	13 \pm 6	13 \pm 6
	Median	10	20	10	10

Tab. 19 KORRELATION ZWISCHEN DEN ERGEBNISSEN AUS VERSUCH 1 UND 2

(als Tastempfindlichkeiten der einzelnen Probanden)

Korrelation der Tastempfindlich- keiten zwischen Versuch 1 und 2	Frontzähne	Eckzähne	Prämolaren	Molaren
Anzahl der Pro- banden	63	58	61	62
Korrelations- koeffizient	0,21	0,14	0,08	0,12
Signifikanz	< 5%	-	-	-

nur bei den Frontzähnen. Wir haben deshalb mit dem Wilcoxon-Test untersucht, ob die Ergebnisse der einzelnen Probanden aus Versuch 1 und 2 in der Höhe der Werte übereinstimmen. Dabei können statistisch die Werte aus Versuch 1 lediglich denen der Frontzähne und Molaren aus Versuch 2 zugeordnet werden (s. Tab. 20, S. 71).

Weiter haben wir berechnet, ob ein Proband, der die Aluminium-oxidkörner im Versuch 1 hauptsächlich mit den Seitenzähnen

Tab. 20 UNTERSCHIED IN DER ZAHLENMÄSSIGEN HÖHE DER ERGEBNISSE
AUS VERSUCH 1 UND 2 BEI DEN EINZELNEN PROBANDEN

Vergleich Versuch 1 mit Versuch 2	Frontzähne	Eckzähne	Prämolaren	Molaren
Anzahl der Probanden	63	58	61	62
Signifikanz des Vergleichs	-	<1%	<5%	-

(bzw. Frontzähnen) ertastet hat, auch im Versuch 2 mit seinen Prämolaren (bzw. Frontzähnen) die höchste Empfindlichkeit besaß. Der Vierfelder-Chiquadrat-Test ergab keine statistischen Zusammenhänge.

10. Diskussion

10.1. Prüfung der Tastfähigkeit mit Aluminiumoxid in Joghurt

Fehlerquellen, die im ersten Versuchsaufbau begründet liegen, haben wir bereits in Kap. 5.2.4. besprochen.

Vergleichbare Untersuchungen wurden unseres Wissens bisher nur von MANLY u.a. (105) sowie von ÖWALL (119, 120) und ÖWALL u.a. (121) durchgeführt.

MANLY u.a. (105) mischten verschiedene Mengen Calcium-Carbonat in Pudding. Die Versuchspersonen mußten entscheiden, ab welchem Anteil Calcium-Carbonat sie eine Strukturveränderung des Puddings bemerkten. Bezahnte Probanden empfanden bereits eine Zumischung von 2,9% Calcium-Carbonat, unbezahnte dagegen erst ab 9% Calcium-Carbonat im Trägermedium. Bei dem Test wurden also ähnlich wie bei unseren Vorversuchen Mengenverhältnisse bestimmt, nicht jedoch die Teilchengröße (ca. 12,5 μm) berücksichtigt.

ÖWALL (120) vermischte unterschiedlich kleine Stahlkugeln mit einer Testnahrung (Popcorn, Käse, Erdnüsse). Die Versuchspersonen sollten während des Kauens die kleinste, gerade noch von ihnen erkannte Stahlkugel identifizieren. Die 50%-Sensibilität lag bei ihm zwischen 560 μm und 650 $\mu\text{m} \pm 100 \mu\text{m}$. Nach diesen Untersuchungen besitzt die Struktur der Speise wenig, die Größe des Bolus jedoch erheblichen Einfluß auf die Ergebnisse.

Nach Untersuchungen von HANNAM u.a. (52) beeinflußt der Kontakt der Zähne mit dem Speisebolus hauptsächlich das normale Kau-funktionsmuster und nicht so sehr der Widerstand der Speise.

Unsere Resultate liegen mit einem Medianwert von 15 μm (Mittelwert 17 $\mu\text{m} \pm 8 \mu\text{m}$) sehr weit unter denen von ÖWALL. Bedingt durch den Aufbau der ersten Versuchsreihe entspricht unser Medianwert der 'absoluten' Tastgrenze unserer Probanden; eine 50%-Sensibilität aus verschiedenen dicken Prüfkörpern läßt sich nicht berechnen.

Die große Diskrepanz der Ergebnisse könnte einerseits sowohl auf der unterschiedlichen Struktur der Trägermedien (Popcorn, Käse, Erdnüsse \leftrightarrow Joghurt) als auch der Prüfkörper (Stahlkugeln

↔ Aluminiumoxid) beruhen, andererseits auf die verschieden ausgeführten Kaubewegungen zurückgeführt werden (52, 120). Um Erdnüsse zu zerkleinern, wird man wahrscheinlich gewohnheitsmäßige Kauzyklen anwenden. Joghurt dagegen verleitet eher zu Reibebewegungen. Es ist anzunehmen, daß die Probanden im Test von ÖWALL ('Stahlkugel-Test') den Zahnreihenschluß etwas vorsichtiger ausführten, da ungerne auf sehr harte Gegenstände in der Nahrung gebissen wird.

Geschlechtsunterschiede

Die Ergebnisse der weiblichen Teilnehmer in unserem Versuch (19 μ m) unterscheiden sich von denen der männlichen Probanden (14 μ m). Geschlechtsunterschiede in der Tastfähigkeit konnten jedoch von anderen Autoren - allerdings bei abweichenden Untersuchungen - nicht nachgewiesen werden (14, 155). Lediglich WILLIAMS u.a. (177) stellten ebenfalls fest, daß die Ergebnisse bei männlichen Probanden - nicht statistisch signifikant - niedriger lagen.

Tagesrhythmus

Einer der zahlreichen Faktoren, die die Resultate beeinflussen, ist der biologische Rhythmus (109). Viele Funktionen des menschlichen Organismus zeigen breite Spektren von Rhythmen sehr verschiedener Frequenz (1/1000 sec bis zu Jahren; [64]). Die tagesrhythmische Schwankung der Leistungsfähigkeit ist demnach als Einflußfaktor zu berücksichtigen (165). Das Maximum der körperlichen Leistungsfähigkeit liegt nachts bei drei Uhr (64). Die "physical working capacity" sinkt dann recht kontinuierlich bis zum folgenden Abend ab, um dann wieder ihr Maximum zu erreichen. Der Tagesgang der psychischen Leistungsfähigkeit verläuft jedoch gegensinnig zur "physiologischen Leistungskurve" (64). Nicht alle Menschen haben im übrigen den gleichen Rhythmus, es gibt Morgen- und Abendtypen (165).

Zunächst verbesserten unsere Probanden ihre Werte sehr kontinuierlich von etwa 19 μ m morgens auf 13 μ m spätnachmittags. Leider konnten wir - bedingt durch unseren Versuchsaufbau - einen Bio-rhythmus nicht von Übungseffekten unterscheiden. Wir verglichen deshalb die jeweils ersten Tests unterschiedlicher Probanden,

die wir nach Tageszeiten aufgliederten. Eine Tagesschwankung der Resultate ließ sich nicht nachweisen. Dies kann natürlich auch daran liegen, daß die individuellen Unterschiede größer sind als die Beeinflussung durch einen Tagesrhythmus.

Tests von gleichen Versuchspersonen an verschiedenen, weit auseinander liegenden Tagen zu gleichen Zeiten (den ersten Test eingeschlossen) brachten eine Verbesserung des Ergebnisses um etwa 3 μ m. Vergleichen wir demgegenüber die beiden letzten Tests eines Probanden an verschiedenen Tagen zu gleichen Zeiten, so waren die Ergebnisse statistisch gleich.

Sicher können wir aus unseren Ergebnissen nur schließen, daß Übungseffekte besonders am Anfang einer Testreihe auftreten. Eine Verfeinerung der Tastfähigkeit im Tagesverlauf ist möglich, müßte jedoch durch einen veränderten Versuchsaufbau überprüft werden.

MANGELS (104) sowie PÖLLMANN (131) stellten bei ihren Versuchen ein Maximum der taktilen Sensibilität am Abend fest, wogegen HOLLSTEIN (67) davon ausgeht, daß die Ergebnisse der Probanden abends aufgrund der Ermüdung schlechter werden könnten. STEWART (164) berichtet über höhere Druck-Schwellenwerte nachmittags gegenüber abends. In den aufgeführten Untersuchungen wurden allerdings keine Übungseffekte berücksichtigt.

Alter

Bei unseren Untersuchungen fanden wir keinen Hinweis, daß zunehmendes Alter die Resultate beeinflußt. Dies steht im Einklang mit den Ergebnissen der Folientests von SIIRILÄ u.a. (156). Bei ÖWALL (120) dagegen erzielten ältere Probanden bessere Ergebnisse als jüngere. SKRAMLIK (158) fand bei alten Menschen eine höhere Berührungsschwelle als bei jüngeren. Altersabhängig war ebenfalls bei LITVAK u.a. (100) das orale Raumempfinden sowie bei BRILL u.a. (14) die Zwei-Punkt-Diskriminierung¹⁾ der Haut

1) Bei der Prüfung der Zwei-Punkt-Diskriminierung der Haut wird mit einem Zirkel untersucht, wie groß der Abstand der Zirkelspitzen ist, wenn diese bei gleichzeitiger Hautberührung nicht mehr getrennt wahrgenommen werden können.

im Trigeminiusbereich.

Zahnführung

Während der Vorbereitung unserer Versuche tauchte der Gedanke auf, daß evtl. die Art der antagonistischen Zahnkontakte in verschiedenen Unterkieferpositionen die Tastfähigkeit beim Kauen beeinflussen könnte; je nachdem, welche Kontakte die Probanden während des Tests benutzen, sind unterschiedlich viele und verschieden große Zahnflächen denkbar, die sich berühren.

Möglicherweise - so unsere Überlegung - würde die Kaubewegung bei Probanden mit einer Gruppenführung gewohnheitsmäßig eher mit seitlicher Komponente verlaufen. Dadurch müßten die Zähne dann auch eher mit größerer horizontaler Komponente belastet werden. MANLY u.a. (105) stellten eine geringere seitliche im Vergleich mit der axialen Berührungsschwelle der Front- und Seitenzähne fest. Unterschiedlich stark einwirkende Kräfte können - ob axial oder horizontal auf die Front- und Eckzähne gebracht - dagegen gleich gut erkannt werden (8, 9). KIZIOR u.a. (82) fanden bei ihren elektrophysiologischen Untersuchungen allerdings bei axialer Zahnbelastung sogar mehr Aktionspotentiale als bei seitlicher Zahnbelastung.

Daß das Parodont der Zähne prinzipiell sehr gut zwischen Reizen aus verschiedenen Richtungen unterscheiden kann, haben ADLER (1), HANNAM (50, 51), JERGE (72), JOHANSSON u.a. (74), KAWAMURA (78), KAWAMURA u.a. (79), NESS (116) sowie PEASLEE (125) nachgewiesen.

Eine Auswirkung der Zahnführung oder der Größe der Abgleitbewegung zwischen retraler Kontaktposition und maximaler Interkuspidation auf die Tastempfindlichkeit ließ sich in unserer Untersuchung nicht nachweisen. Nach GRAF u.a. (42, 43) finden die meisten Zahnkontakte während des Kauzyklus in maximaler Interkuspidation statt; auch PAMEIJER u.a. (123) fanden dabei nur vereinzelt Berührungen in retraler Kontaktposition. Nach SCHAEERER u.a. (142) haben die während des Kauens sehr kurzen exzentrischen Zahnkontakte eher die Aufgabe, den Unterkiefer in die maximale Interkuspidation zu leiten. Unsere Ergebnisse stehen in Einklang mit diesen Beobachtungen.

10.2. Prüfung der Tastfähigkeit mit Kupferfolien zwischen antagonistischen Zahnpaaren

In Kap. 5.3.3. wurde bereits auf mögliche Fehlerquellen im Versuchsaufbau hingewiesen.

Untersuchungen zur taktilen Sensibilität mit Hilfe von Drähten oder Folien zwischen antagonistischen Zähnen wurden bereits mehrfach durchgeführt (16, 67, 87, 88, 108, 155, 168, 170; vgl. Tab. 2, S. 10).

50%-Sensibilität

Die grundlegende Arbeit zur Definition der sogenannten '50%-Sensibilität' (S_{50}) der Zähne stammt von TRYDE u.a. (170). Die Autoren gehen von dem Gedanken aus, daß das Tastvermögen mit einer geringen Folienstärke an der Wahrnehmungsschwelle nicht abrupt aufhört. Prüft man diese Folie mehrfach zwischen antagonistischen Zähnen, so wird sie der Proband einmal spüren, das nächste Mal jedoch nicht unbedingt wahrnehmen. Testet man nun immer dünnere Folien, so wird die Versuchsperson ab einer bestimmten Schwelle keinen Fremdkörper mehr zwischen den Zähnen ausmachen können. Auf diese Weise läßt sich nach Versuchsende eine 50%-Sensibilität errechnen. Prüft man eine Folie der S_{50} -Schwelle z. B. 10mal, so wird sie also fünfmal erkannt und fünfmal nicht erkannt. Die S_{50} -Schwelle wird in der Regel größer sein als die 'absolute' Tastgrenze, denn im Extremfall ist die 'absolute' Tastschwelle unserer Untersuchung eine 10%-Sensibilität.

Absolute Tastfähigkeit und 50%-Sensibilität

Unsere Medianwerte der absoluten Tastfähigkeit betragen für die Frontzähne, Prämolaren und Molaren je 10 μm und für die Eckzähne 20 μm . Wie oben ausgeführt, liegen die Medianwerte der 50%-Sensibilität höher, nämlich bei 29 μm für die Frontzähne, bei 63 μm für die Eckzähne und bei 17 μm für die Prämolaren und die Molaren (vgl. Tab. 15, S. 66). Unsere Werte stimmen in der Größenordnung gut mit den in der neueren Literatur beschriebenen Resultaten überein (vgl. Tab. 2, S. 10). Dort wurden bis heute keine Folien unter 8 μm getestet; auch wurde nicht versucht, die Knochenleitung auszuschalten.

HOLLSTEIN (67) ist der einzige, der für alle Zahnarten Ergebnisse für die absolute Tastfähigkeit veröffentlicht hat. Er fand die niedrigsten Werte für die Frontzähne. Bei den Prämolaren und Molaren lag die Tastschwelle höher. Dies können wir nicht bestätigen.

Zu unserer Überraschung konnten die Probanden mit den Prämolaren und Molaren am sichersten tasten. Dies äußert sich sowohl in einer geringen absoluten Schwelle als auch in einem niedrigen S_{50} -Wert. Das Ergebnis stimmt mit den Aussagen der Versuchspersonen in Versuch 1 überein, wo viele der Probanden angaben, die Aluminiumoxidkörner mit den Seitenzähnen entdeckt zu haben.

Tastfähigkeit der einzelnen Zahnarten

Die absolute Tastschwelle der Frontzähne ist zwar mit der der Prämolaren und Molaren identisch, doch ist ihre 50%-Schwelle höher. Dies widerspricht den Resultaten von SIIRILÄ u.a. (155), die - nicht signifikant - eine größere Sensibilität der Front- im Vergleich mit den Seitenzähnen feststellten. Der Eckzahn weist sowohl für die absolute Tastgrenze wie vor allem beim S_{50} -Wert wesentlich schlechtere Resultate als die anderen Zahnarten auf. (vgl. Tab. 15, S. 66 u. Abb. 26, S. 67).

Es ist nicht ausgeschlossen, daß dies mit den verschiedenen Taststellungen des Unterkiefers während des Tests mit den Frontzähnen im Gegensatz zu denen der Seitenzähne zusammenhängt. Je nach dem Grad der Mundöffnung könnten unterschiedliche Rezeptorensysteme für die Perzeption verschiedener Fremdkörper-Dicken verantwortlich sein (vgl. Kap. 4.6., Tab. 4, S. 21).

Sehr dünne Folien lassen bei den Seitenzähnen Zahnkontakte benachbarter Zähne zu. Eine Perzeption über die unterschiedlich große Bewegung dieser Zähne in der Alveole im Vergleich zu den Testzähnen wäre denkbar. YAMADA (178), der 1967 elektrophysiologische Untersuchungen am Hund durchführte, fand, daß eine Zahnbewegung von 2 - 3 μ m Aktionspotentiale in den zugehörigen Nerven-einheiten auslösen kann. Nach 10 μ m Bewegung eines einzelnen Zahnes kam es zu deutlichen Reizantworten. In der Größenordnung stehen unsere Ergebnisse durchaus in Einklang mit diesen Resultaten.

taten. SIEBERT (152) stellte fest, daß es beim Zahnreihenschluß zu Bewegungen zwischen 5 bis 10 μ m nach lingual und distal kommt. Über das Ausmaß der axialen Bewegung dabei findet sich keine Angabe.

Bei dem Test antagonistischer Front- und Eckzähne, die öfter in der Schneidekante-Schneidekante-Position keine weiteren Kontakte benachbarter Zähne aufweisen, ist ein solcher Tastmodus jedoch unwahrscheinlich. Das Parodont alleine kann in diesen Fällen die Dickendifferenzierung nicht vermitteln. In Frage kämen Rezeptoren im Kiefergelenk oder in der Kaumuskulatur.

Auffällig bleibt auch der Tastunterschied zwischen den Front- und Eckzähnen. Für beide Zahnarten war der Grad der Mundöffnung beim Test sicherlich etwa gleich groß, wenn auch die Prüfung der Eckzähne zusätzlich eine seitliche Verschiebung des Unterkiefers erforderte. Diese verringerte Empfindlichkeit der Eckzähne können wir zur Zeit noch nicht schlüssig erklären. Wir glauben, daß dies weder mit der Größe der Wurzel und der unterschiedlichen Druckbelastung bis zur Reizmeldung noch mit einer genetisch bedingten verringerten Innervation des Parodonts der Eckzähne zu erklären ist. Jedenfalls beanspruchen im Gegenteil die Eckzähne von Tieren - die allerdings größer als die menschlichen sind - im Nucleus principalis und Nucleus spinalis N. trigemini des Gehirns das flächenmäßig größte Projektionsgebiet aller Zahnarten (79, 92).

Wir fanden bei unseren Untersuchungen keinen sicheren Unterschied zwischen der Tastfähigkeit von Probanden mit Gruppenführung und solchen mit Front-Eckzahnführung (s.u.). Wir haben allerdings während des Versuchs die benachbarten Zahnkontakte in Schneidekante-Schneidekante-Position der Front- wie der Eckzähne nicht bei jedem Probanden individuell ausgewertet.

Geschlecht

In Übereinstimmung mit SIIRILÄ u.a. (155) konnten wir keine Unterschiede zwischen der absoluten Tastschwelle männlicher und weiblicher Probanden nachweisen. ADLER (1) prüfte 1947 die maximale Belastungsschwelle und berichtete über niedrigere Werte bei Mädchen. Nach der Untersuchung der Zwei-Punkt-Diskriminierung

der Haut fanden BRILL u.a. (14) keine Geschlechtsunterschiede. Auch WILLIAMS u.a. (177) fanden bei der Differenzierung verschieden dicker Prüfkörper zwischen Frontzähnen keinen Einfluß des Geschlechts auf die Werte.

Alter

Bei unseren Untersuchungen der Tastfähigkeit aller Zahngruppen konnten wir - wie auch SIIRILÄ u.a. (156) bei Tests zwischen Frontzähnen - keine Altersabhängigkeit nachweisen. Unsere Altersgruppen waren allerdings nicht gleichmäßig besetzt. ÖWALL (120) berichtet dagegen über ein verbessertes Tastempfinden mit zunehmendem Alter.

Tageszeit

HOLLSTEIN (67), MANGELS (104) und PÖLLMANN u.a. (131) fanden Schwankungen der Tastempfindung im Tagesverlauf. Diese Aussagen ließen sich mit unserer Versuchsanordnung, in der die Tastergebnisse verschiedener Probanden daraufhin überprüft wurden, nicht bestätigen.

Zahnärztliche Restaurationen

Prüften wir gruppenweise (vgl. Kap. 7.2.1.) die einzelnen restaurativen Therapiemittel, so konnten wir eine unterschiedliche Zahnempfindlichkeit nicht nachweisen.

Verglichen wir alle zahnärztlich behandelten mit den nicht behandelten Zähnen, so waren die Tastwerte der behandelten Frontzähne und Molaren schlechter (vgl. Tab. 17, S. 69). Bei den Eckzähnen und Prämolaren ließen sich die Unterschiede statistisch nicht sichern. Dieses Resultat können wir zur Zeit nicht befriedigend erklären.

SKRAMLIK (158) berichtet, daß die konservative Versorgung eines Zahnes ohne Bedeutung für die Druckempfindung ist. Im Gegensatz dazu fanden GNEUPEL-GREIZ (41), HOLLSTEIN (67) und LOEWENSTEIN u.a. (101) die Tastfähigkeit mit feststitzendem Ersatz weniger stark ausgeprägt. Daß Zähne mit einer Wurzelfüllung die gleiche Tastempfindung haben wie solche mit vitalem Zahnmark, konnten verschiedene Autoren nachweisen (7, 41, 60, 61, 67, 99, 116, 126, 168). Lediglich SKRAMLIK (158) berichtet über eine "tief-

greifende Veränderung" der Druckempfindung bei wurzelgefüllten Zähnen. Bei unseren Probanden lagen zu wenig wurzelgefüllte Zähne vor, so daß wir diesen Faktor nicht berücksichtigt haben. Wir glauben aber, daß die Rezeptoren für eine Tastempfindung der Zähne im Parodont und nicht in der Pulpa lokalisiert sind (vgl. auch Kap. 4 und folgende Ausführungen).

Zahnführung

Eine Abhängigkeit der absoluten Tastempfindlichkeit von der Art der Zahnführung bei exzentrischen Unterkieferbewegungen konnten wir für die Front-, Eckzähne und Prämolaren statistisch sichern (vgl. Tab. 14, S. 54). Die Probanden mit einer Front-/Eckzahnführung hatten bei diesen Zähnen ein feineres Tastempfinden als solche mit einer Gruppen- oder Gruppen-Eckzahnführung. Die Ergebnisse der 50%-Sensibilität bestätigen dieses Resultat - mit Ausnahme der Frontzähne - jedoch nicht. Deshalb - und weil wir nur elf Probanden mit sofort einsetzender Eckzahnführung untersuchen konnten - betrachten wir diesen Zusammenhang mit großer Skepsis und möchten ihm keine Bedeutung beimessen.

10.3. Vergleich zwischen Versuch 1 und 2

Die statistischen Tests zur absoluten Tastschwelle ergaben bei beiden Versuchen in der Größenordnung durchaus übereinstimmende Resultate (vgl. Tab. 18, S. 70). Jedoch können die Werte der einzelnen Probanden von Versuch 1 statistisch gesehen nur ihren Frontzähnen und Molaren aus Versuch 2 zugeordnet werden. Große Meßwerte in Versuch 1 korrelieren lediglich mit ebenfalls großen Meßwerten der Frontzähne in Versuch 2. Beide Aussagen bedeuten aber, daß die zwei Untersuchungsmethoden nicht ohne weiteres gegeneinander ausgetauscht werden können. Mit beiden Methoden werden verschiedene Tastempfindlichkeiten geprüft. Dies liegt möglicherweise an den in Versuch 1 durchgeführten Kau- bzw. Reibbewegungen ("dynamische Tastschwelle", STEENBERGHE [162]), die gegenüber den Hackbewegungen des Versuchs 2 ("aktive" Tastschwelle, STEENBERGHE [162]) vielleicht in ein komplexeres Reflexgeschehen eingebettet sind. Die Zähne könnten durch die

Rauhigkeit der Aluminiumoxid-Schleifkörper z. B. in geringe Vibration gesetzt worden sein. Allerdings bietet die hier zum erstenmal vorgestellte Methode der Prüfung der absoluten Tastempfindlichkeiten mit Aluminiumoxid-Körnern in Joghurt den Vorteil, viele Probanden prüfen zu können. Für den einzelnen Test ist höchstens $1/4$ der Zeit im Vergleich mit Folienversuchen nötig. Die Höhe des Schwellenwertes läßt sich recht gut festlegen, der natürliche Kauzyklus wird nicht durch Fremdeinwirkung gestört.

Kein Proband gab am Versuchsende an, die Körner in der Joghurt auch mit der Zunge empfunden zu haben. Wir könnten daraus vorsichtig schließen, daß die Zahnsensibilität gegenüber Fremdkörpern der allgemein bekannten hohen Empfindlichkeit der Zunge teilweise noch überlegen ist.

11. Zusammenfassung

In zwei Versuchsreihen wurde die Tastempfindlichkeit natürlicher Zähne gemessen. Zuerst ermittelten wir den absoluten Tast-Schwellenwert mit Hilfe einer Joghurtspeise, in der ca. 0,3 Gewichtsprozent Aluminiumoxiddkörner gleichmäßig verteilt waren. Der Schwellenwert beträgt 15 μm (Medianwert), wobei männliche Probanden geringfügig kleinere Fremdkörper wahrnehmen konnten als weibliche Versuchspersonen. Bei mehreren Tests derselben Versuchsperson konnte der Schwellenwert durch Übungseffekte beeinflusst, jedoch nicht beliebig verkleinert werden.

In der zweiten Versuchsreihe untersuchten wir mit Hilfe von Kupferfolien das Tastvermögen bezahnter Probanden. Die absolute Tastschwelle ergab folgende Werte: Frontzähne, Prämolaren und Molaren 10 μm , Eckzähne 20 μm .

Die Berechnung der 50%-Sensibilität ergab für die Frontzähne 29 μm , für die Eckzähne 63 μm und für die Prämolaren und Molaren jeweils 17 μm . Geschlechtsabhängige sowie tagesrhythmische Schwankungen der Tastempfindung konnten nicht nachgewiesen werden.

Die deutlich geringere Empfindlichkeit der Eckzähne gegenüber den anderen Zahnarten erfordert bei zukünftigen Tests weitere Aufmerksamkeit.

Bei beiden Versuchen war keine statistisch gesicherte Abhängigkeit der Tastempfindung der Probanden vom Alter, der Zahnführung, der Abgleitbewegung zwischen retraler Kontaktposition und maximaler Interkuspidation sowie der zahnärztlichen Versorgung der Zähne nachweisbar.

Beide Versuchsreihen testeten verschiedene Tastempfindlichkeiten und sind deshalb nicht gegeneinander austauschbar.

Aus praktischer Sicht bedeuten die Ergebnisse für den Zahnarzt, daß der okklusalen Äquilibrierung zahnärztlicher Arbeiten eine große Aufmerksamkeit gewidmet werden muß.

12. Literaturverzeichnis

1. ADLER, P. Sensibility of teeth to loads applied in different directions
J. Dent. Res. 26, 279 (1947)
2. ANDERSON, D. J.
HANNAM, A. G.
MATTHEWS, B. Sensory mechanisms in mammalian teeth and their supporting structures
Physiol. Rev. 50(2), 171 (1970);
DIMDI¹⁾
3. BERKOVITZ, B. K. B.
SHORE, R. C. High mitochondrial density within peripheral nerve fibres of the periodontal ligament of the rat incisor
Archs oral Biol. 23, 207 (1978)
4. BERNICK, S. Innervation of teeth and periodontium after enzymatic removal of collagenous elements
O. S., O. M., & O. P. 10, 323 (1957)
5. BIEN, S. M.
AYERS, H. D. Responses of rat maxillary incisors to loads
J. dent. Res. 44(3), 517 (1965)
6. BOLLINGER, K.
LUKAS, D. Belastungsempfindung oberer Eckzähne
Dtsch. zahnärztl. Z. 29, 283 (1974)
7. BOLLINGER, K.
LUKAS, D.
MAIER, H. Zur Frage der Kraftrezeptoren bei vitalen und marktoten Zähnen
Dtsch. Zahnärztl. Z. 31, 418 (1976)
8. BONAGURO, J. G.
DUSZA, G. R.
BOWMAN, D. C. Ability of human subjects to discriminate forces applied to certain teeth
J. Dent. Res. 48(2), 236 (1969)
DIMDI
9. BOWMAN, D. C.
NAKFOOR, P. M. Evaluation of the human subject's ability to differentiate intensity of forces applied to the maxillary central incisors
J. Dent. Res. 47(2), 252 (1968)
10. BRADLAW, R. The innervation of teeth
Proc. of the Royal Soc. of Med. 29, 507 (1936)

¹⁾ Auf die mit DIMDI gekennzeichnete Literatur wurden wir durch das Deutsche Institut für medizinische Dokumentation und Information aufmerksam gemacht.

11. BRASHEAR, A. D. The innervation of the teeth
J. Comp. Neurology 64, 169 (1936)
12. BRENNAN, H. S. Interrelationship between the elec-
 BLACK, M. A. tromyographic silent period and den-
 COSLET, J. G. tal occlusion
J. dent. R. 47, 502 (1968)
13. BRILL, N. Aspects of occlusal sense in natural
 SCHÜBELER, S. and artificial teeth
 TRYDE, G. J. Pros. Den. 12, 123 (1962)
14. BRILL, N. Age changes in the two-point discri-
 TRYDE, G. mination threshold in skin inner-
 MORGAN, G. vated by the trigeminal nerve
 REES, D. A. J. Oral Rehabilitation 1, 149 (1974)
15. BYERS, M. R. Trigeminal nerve endings in gingiva,
 HOLLAND, G. R. junctional epithelium and periodontal
 ligament of rat molars as demon-
 strated by autoradiography
Anat. Rec. 188, 509 (1977)
16. CAFFESSE, R. G. Influence of temporomandibular joint
 CARRARO, J. J. receptors on tactile occlusal per-
 ALBANO, E. A. ception
J. periodont. Res. 8, 400 (1973)
17. CATTON, W. T. Mechanoreceptor function
Physiol. Rev. 50, 297 (1970)
18. CECCONI, G. Beitrag zum Studium des Empfindungs-
 vermögens gesunder Zähne
Stomatologia 1(3), (1905)
19. CHRISTENSEN, L. V. Periodontal discriminatory ability
 LEVIN, A. C. in human subjects with natural den-
 titions, overlay dentures and com-
 plete dentures
J. Dent. Ass. S. Afr. 31, 339 (1976)
20. CHRISTENSEN, J. Dimension discrimination at two
 MORIMOTO, T. different degrees of mouth opening
 and the effect of anaesthesia applied
 to the periodontal ligaments
J. of Oral Rehabilitation 4, 157
(1977)

21. COOLIDGE, E. D. The thickness of the human perio-
dental membrane
J. A. D. A. & D. Cos. 24, 1260 (1937)
22. CORPRON, R. E. Ultrastructure of nerve endings in
AVERY, J. K. the periodontal ligament of mice
LEE, S. D. JADR Abstracts, 75 (1974)
COX, C. F.
23. CRUM, R. J. Oral perception and proprioception:
LOISELLE, R. J. a review of the literature and its
significance to prosthodontics
J. Pros. Dent. 28, 215 (1972)
24. DARIAN-SMITH, I. 'Tactile' stimulus intensity: infor-
ROWE, M. J. mation transmission by relay neurons
SESSLE, B. J. in different trigeminal nuclei
Science 160, 791 (1968)
25. DEPENDORF Nervenverteilung in der Zahnwurzel-
haut des Menschen
Dtsch. Monatsschr.f. ZHK 31, 853
(1913)
26. DRECHSLER, F. Neurophysiologische Analyse der Wir-
KOHNO, S. kungen okklusaler Interferenzen auf
KÜHL, W. Regulation und Koordination der Kau-
NEUHAUSER, B. muskulatur
Dtsch. zahnärztl. Z. 28(6), 695
(1973)
27. DUDEL, J. Allgemeine Sinnesphysiologie
in: Grundriß der Sinnesphysiologie
Hrsg. R. F. Schmidt
Springer-Verl., Berlin (1973)
28. DYNAMIT NOBEL Druckschriften über Bikorit[®] und
Redurit[®]
29. EDEL, A. A method of studying the effects of
WILLS, D. J. reduced alveolar support on the sen-
sibility to axial force on the in-
cisor teeth in humans
J. of clinical Periodontology 2, 218
(1975)
30. ESCHLER, J. Mandibulo-motorische Koordinations-
störungen als Ursache funktioneller
Kiefergelenkserkrankungen und deren
Therapie
Fortschr. d. Kiefer- u. Gesichts-
Chirurgie 6, 64 (1960)

31. ESCHLER, J. Das Kausystem als Funktionskreis
Morph. Jahrbuch 104, 444 (1963)
32. FACHVERBAND ELEKTRO- FEPA-Korngrößen-Standard für Schleif-
KORUND- UND SILI- mittel auf Unterlagen
ZIUMKARBID 30 - D (1972)
33. FALIN, L. I. The morphology of receptors of the
tooth
Acta anat. 35, 257 (1958)
34. FRANK, R. M. Ultrastructure du ligament alvéolo-
FELLINGER, E. dentaire du rat
STEUER, P. J. Biol. Buccale 4, 295 (1976)
35. FRÖHLICH, E. Die Struktur des Desmodonts (Wurzel-
haut) in Abhängigkeit von Richtung
und Intensität seiner Beanspruchung
Dtsch. zahnärztl. Z. 22, 798 (1967)
36. FUCHS, P. Experimentelle Untersuchungen über
WEIDLICH, V. die Beeinflussung der nächtlichen
Kaumuskelaktivität durch Okklusions-
störungen
Dtsch. zahnärztl. Z. 28, 1064 (1973)
37. FUNAKOSHI, M. Periodontal jaw muscle reflexes in
AMANO, N. the albino rat
J. Dent. Res. 53, 598 (1974)
38. GANONG, W. F. Medizinische Physiologie
Springer-Verl., Berlin (1972²)
39. GARTON, C. P. Device for recording thresholds to
mechanical stimulation of human teeth
J. Dent. Res. 47(6), 975 (1968)
40. GERNET, W. Untersuchungen zur Aussage der kine-
siographischen Funktionsanalyse
Dtsch. zahnärztl. Z. 36, 304 (1981)
41. GNEUPEL-GREIZ, J. Die Empfindlichkeit der Zähne gegen-
über Druck
Med. Diss., Berlin (1951)
42. GRAF, H. Tooth contact patterns in mastication
ZANDER, H. A. J. Pros. Dent. 13, 1055 (1963)

43. GRAF, H.
ZANDER, H. A. Okklusale Zahnkontakte und Muskelaktivität beim Kauen und Schlucken
Schw. Monatsschr. f. ZHK 74, 495 (1964)
44. GRIFFIN, C. J.
HARRIS, R. Unmyelinated nerve endings in the periodontal membrane of human teeth
Archs oral Biol. 13, 1207 (1968)
45. GRIFFIN, C. J.
HARRIS, R. Innervation of human periodontium
Austr. Dent. J. 19, 51 (1974)
46. GRIFFIN, C. J.
HARRIS, R. Innervation of the human periodontium
Austr. Dent. J. 19, 255 (1974)
47. GRIFFIN, C. J.
SPAIN, H. Organization and vasculature of human periodontal ligament mechanoreceptors
Archs oral Biol. 17, 913 (1972)
48. HÄUPL, K. Lehrbuch der Zahnheilkunde
Urban & Schwarzenberg, Wien (1949)
49. HANNAM, A. G. The response of periodontal mechanoreceptors in the dog to controlled loading of teeth
Archs oral Biol. 14, 781 (1969)
50. HANNAM, A. G. Spontaneous activity in dental mechano-sensitive units in the dog
Archs oral Biol. 14, 793 (1969)
51. HANNAM, A. G. Receptor fields of periodontal mechanosensitive units in the dog
Archs oral Biol. 15, 971 (1970)
52. HANNAM, A. G.
DeCOU, R. E.
SCOTT, J. D.
WOOD, W. W. The relationship between dental occlusion, muscle activity and associated jaw movement in man
Archs oral Biol. 22, 25 (1977)
53. HANNAM, A. G.
FARNSWORTH, T. J. Information transmission in trigeminal mechanosensitive afferents from teeth in the cat
Archs oral Biol. 22, 181 (1977)
54. HANNAM, A. G.
MATTHEWS, B. Reflex jaw opening in response to stimulation of periodontal mechanoreceptors in the cat
Archs oral Biol. 14, 415 (1969)

55. HANNAM, A. G.
MATTHEWS, B.
YEMM, R.
Receptors involved in the response
of the masseter muscle to tooth con-
tact in man
Archs oral Biol. 15, 17 (1970)
56. HARRIS, R.
GRIFFIN, C. J.
Innervation of the human periodon-
tium
Austr. Dent. J. 19, 174 (1974)
57. HARRIS, R.
GRIFFIN, C. J.
Innervation of the human periodon-
tium
Austr. Dent. J. 19, 326 (1974)
58. HASSENSSTEIN, D.
Über die Lokalisation von Druck-
reizen auf den Zähnen
Med. Diss., Berlin (1951)
59. HENERS, M.
Syndesmotoc limiting movement
Int. Dent. J. 24, 319 (1974)
60. HENSEL, H.
Sinnesempfindung in der Mundhöhle
in: Die Zahn-, Mund- und Kieferheil-
kunde; Hrsg.: Häupl, Meyer, Schuch-
hardt
Urban & Schwarzenberg, München (1958)
61. HERHOLZ, T.
Die taktile Sensibilität bei mark-
toten und wurzelspitzenamputierten
oberen Frontzähnen
Med. Diss., Tübingen (1978)
62. HEUSER, H.
Zur Frage der physiologischen Zahn-
beweglichkeit unter besonderer Be-
rücksichtigung der Bedeutung des
nervalen Faktors
Stoma 22(1), 7 (1969)
63. HEUSER, H.
Zur Frage der physiologischen Zahn-
beweglichkeit unter besonderer Be-
rücksichtigung der Bedeutung des
nervalen Faktors
Stoma 22(2), 69 (1969)
64. HILDEBRANDT, G.
Spontan-rhythmische Schwankungen
der Leistungsfähigkeit beim Men-
schen
Med. Welt 22(16), 640 (1971)

65. HIMMEL, G. K.
MARTHALER, T. M.
RATEITSCHAK, K. H.
MÜHLEMANN, H. R.
Experimental changes of diurnal periodicity in the physical properties of periodontal structures
Helv. odont. Acta 1, 16 (1957)
66. HOFMANN, M.
Ein weiterer Beitrag zur Frage der Gefäßverteilung im Desmodontalraum
Dtsch. zahnärztl. Z. 4, 505 (1968)
67. HOLLSTEIN, W.
Untersuchungen über das Dickenunterscheidungsvermögen bei natürlichen Zähnen und insbesondere bei fest sitzendem und herausnehmbarem abgestützten Ersatz
Dtsch. Monatsschr. f. Zahnheilk. 2, 25 (1933)
68. HUPFAUF, L.
Funktionelle Beziehungen zwischen Okklusion und Kiefergelenk
Dtsch. Zahnärzteblatt 23, 563 (1968)
69. HUPFAUF, L.
Okklusions- und Artikulationsdiagnostik in der prothetischen Zahnheilkunde; in: Praxis der Zahnheilkunde, Bd. III, C 3; Hrsg.: Haunfelder, Hupfau, Ketterl, Schmuth
Urban & Schwarzenberg, München (1969)
70. IMMICH, H.
Medizinische Statistik
Schattauer Verl., Stuttgart (1974)
71. JENZ, K. P.
Die Berührungsschwelle menschlicher Zähne
Med. Diss., Tübingen (1976)
72. JERGE, C. R.
Organisation and function of the trigeminal mesencephalic nucleus
J. of Neurophysiology 26, 379 (1963)
73. JERGE, C. R.
The function of the nucleus supra-trigeminalis
J. of Neurophysiology 26, 393 (1963)
74. JOHANSSON, R. S.
Microelectrode recordings from human oral mechanoreceptors
Brain Research 118, 307 (1976)
75. KADANOFF, D.
Die Nerven und Nervenendigungen in der Zahnwurzelhaut des Menschen
Verh. d. Phys.-med. Ges. N.F. Bd L IV, 27 (1929)

76. KAHLE, W.
LEONHARDT, H.
PLATZER, W. Taschenatlas der Anatomie
Thieme-Verl., Stuttgart (1973)
77. KAWAMURA, Y. Neurophysiologic background of
occlusion
Periodontics 5, 175 (1967)
78. KAWAMURA, Y. Frontiers of oral physiology; Bd 1
u. Bd 2
Karger Verl. (1974)
79. KAWAMURA, Y. Projection of dental afferent im-
pulses to the trigeminal nuclei of
the cat
Japan. J. Physiol. 16, 584 (1966)
80. KAWAMURA, Y. Studies on oral sensory thresholds
WATANABE, M. Med. J. Osaka Univ. 10, 291 (1960)
81. KIDOKORO, Y. Possible interneurons responsible
KUBOTA, K. for reflex inhibition of motoneurons
SHUTO, S. of jaw-closing muscles from the in-
SUMINO, R. ferior dental nerve
J. Neurophysiol. 31, 709 (1968)
82. KIZIOR, J. E. Functional and histologic assessment
CUOZZO, J. W. of the sensory innervation of the
BOWMAN, D. C. periodontal ligament of the cat
J. Dent. Res. 47(1), 59 (1968)
83. KLEINHANSS, G. Über Sinn und Anwendbarkeit von
PIEKARSKI, C. Mittelwerten
STEIN, W. Arzneim.-Forsch. 25, 156 (1975)
84. KÖRBER, K. Periodontal pulsation
J. Periodont. 14, 382 (1971)
85. KÖRBER, K. Zahnärztliche Prothetik, Bd I
Thieme-Verl., Stuttgart (1975)
86. KÖRBER, K. Berührungslos-elektronisches Ver-
fahren zur Messung der Zahnbeweg-
lichkeit
ZWR 85, 20 (1976)
87. KRAFT, E. Raum- und Ordnungsgefühl und Tast-
sinn in der Mundhöhle
Dtsch. zahnärztl. Z. 17, 365 (1962)

88. KRAFT, E.
FLICK, A. Über eine experimentelle Prüfung der
Tastfähigkeit und des Lokalisierver-
mögens bei schleimhautgelagertem
Zahnersatz
Dtsch. zahnärztl. Z. 18, 93 (1963)
89. KROGH-POULSEN, W. G. Individuel okklusion
Tandlaegebl. 62, 231 (1958)
90. KROGH-POULSEN, W. G. Zusammenhänge zwischen Lokalisation
von Abrasionsfacetten und Schmerzen
in der Kaumuskulatur und deren Be-
deutung für Diagnostik und Behand-
lung
Öst. Z. Stomat. 64, 402 (1967)
91. KROGH-POULSEN, W. G.
OLSSON, A. Management of the occlusion of the
teeth; in: Schwartz, L.; Chayes, C.
M., Facial pain and mandibular dys-
function
Saunders, Philadelphia (1968)
92. KRUGER, L.
MICHEL, F. A single neuron analysis of buccal
cavity representation in the sensory
trigeminal complex of the cat
Arch oral Biol. 7, 491 (1962)
93. KRUGER, L.
WITKOVSKY, P. A functional analysis of neurons
in the dorsal column nuclei and
spinal nucleus of the trigeminal in
the reptile (alligator mississippien-
sis)
J. Comparative Neurology 117, 97 (1961)
94. KUBOTA, K.
MASEGI, T. Topological distribution of muscle
spindles in human jaw muscle
J. Dent. Res. 55, Sp. Iss. D 170
(1976)
95. KULIKOV, J. Untersuchungen über die physiolo-
gische und pathologische Zahnbeweg-
lichkeit
Zahnärztl. Praxis 31, 439 (1980)
96. deLANGE, A. Fiber diameter spectrums in the
terminal branches of the inferior
dental nerve
J. Dent. Res. 47, Supp. 6, 974 (1968)

97. LAUTENBACH, E. Über Nervstrukturen im Weichgewebe
des marginalen Parodonts
SMfZ 76(2), 165 (1966)
98. LEWINSKY, W.
STEWART, D. The innervation of the periodontal
membrane of the cat, with some ob-
servations on the function of the
end-organs found in that structure
J. Anatomy 71, 232 (1937)
99. LINDEN, R. W. A. Touch thresholds of vital and non-
vital human teeth
Experim. Neurol. 48, 387 (1975)
DIMDI
100. LITVAK, H.
SIVERMAN, S. I.
GARFINKEL, L. Oral stereognosis in dentulous and
edentulous subjects
J. Prosth. Dent. 25, 139 (1971)
DIMDI
101. LOEWENSTEIN, W. R.
RATHKAMP, R. A study on the pressoreceptive sen-
sibility of the tooth
J. Dent. Res. 34(2), 287 (1955)
102. LUKAS, D.
BOLLINGER, K.
SCHULTE, W. Über das Differenzierungsvermögen
des odonto-parodontalen Rezeptor-
apparates
Dtsch. zahnärztl. Z. 31, 411 (1976)
103. LUND, J. P.
McLACHLAN, R. S.
DELOW, P. G. A lateral jaw movement reflex
Experim. Neurol. 31, 189 (1971)
104. MANGELS, K. J. Untersuchungen zur Adaptation der
Mandibula an okklusale Interferenzen
im Verlaufe eines Tages ohne unnötige
Beeinflussung des Probanden
Med. Diss., Marburg (1971)
105. MANLY, R. R.
PFAFFMAN, C.
LATHROP, D.
KEYSER, J. Oral sensory thresholds of persons
with natural and artificial den-
titions
J. Dent. Res. 31, 305 (1952)
106. MARTINKO, V. Bestimmt das Desmodont (Wurzelhaut)
die Belastungsgrenze des Zahnes?
Dtsch. zahnärztl. Z. 23, 910 (1968)
107. MATTHEWS, B. Action potentials from dental mecha-
noreceptors in the dog
J. dent. Res. 44(6), Brit. Div. Ab-
str. (1965)

108. MELA, F.
PRETTI, F. Tactile sensivity of natural and artificial teeth
Minerva Stomat. 14, 653 (1965)
109. MENZEL, W. Menschliche Tag-Nacht-Rhythmik und Schichtarbeit
Verl. Schwabe & Co, Basel (1962)
110. MORIMOTO, T.
OGATA, K.
OZAKI, M. Interdental dimension discrimination in edentulous patients
J. Dent. Res. 55, Spec. Iss. D 170 (1976)
111. MÜHLBRADT, L.
JENZ, K.-P.
LUKAS, D. Die Berührungsschwelle bei gesunden und erkrankten Parodontien
Dtsch. zahnärztl. Z. 31, 406 (1976)
112. MÜHLBRADT, L.
LUKAS, D.
BOLLINGER, K. Belastungsempfindung und taktile Schwelle an Oberkieferzähnen
Dtsch. zahnärztl. Z. 30, 406 (1975)
113. MÜHLBRADT, L.
MEYLE, J.
LUKAS, D.
SCHULTE, W. Die Tastsensibilität Tübinger Sofort-implantate
Dtsch. zahnärztl. Z. 35, 334 (1980)
114. MÜHLEMANN, H. R. Die physiologische und pathologische Zahnbeweglichkeit
SMfZ 61, 1 (1951)
115. MÜNCH, J.
SCHRIEVER, H. Die Zähne als Sinneswerkzeug
Zeitschr. f. Biol. 91, 75 (1931)
116. NESS, A. R. The mechanoreceptors of the rabbit mandibular incisor
J. Physiol. 126, 475 (1954)
117. NEUMANN, H. H.
DISALVO, N. Compression of teeth under the load of chewing
J. Dent. Res. 36, 286 (1957)
118. NISHIYAMA, T.
FUNAKOSHI, M.
KAWAMURA, Y. A study on sensibility of the human tooth
J. dent. Res. 46, Supp. 1, 136 (1967)
119. ÖWALL, B. Oral tactility during chewing
Scand. J. dent. Res. 78, 431 (1970)
DIMDI

120. ÖWALL, B. Oral tactility during chewing
Odont. Revy 25, 135 (1974)
121. ÖWALL, B.
VORWERK, P. Analysis of a method for testing
oral tactility during chewing
Odont. Revy 25, 1 (1974)
122. O'ROURKE, J. T. Oral Physiology. Chap. 7.
C. V. Mosby Company, St. Louis
(1951)
123. PAMEIJER, J. H. N.
BRION, M.
GLICKMAN, I.
ROEBER, F. W. Intra oral occlusal telemetry.
Effect of occlusal adjustment upon
tooth contacts during chewing and
swallowing
J. Prosth. Dent. 24, 492 (1970)
124. PARFITT, G. J. Measurement of the physiological mo-
bility of individual teeth in an
axial direction
J. dent. Res. 39, 608 (1960)
125. PEASLEE, E. R. Human histology in its relations
to descriptive anatomy, physiology,
and pathology
Blanchard and Lea, Philadelphia (1857)
126. PFAFFMANN, C. Afferent impulses from the teeth due
to pressure and noxious stimulation
J. Physiol. 97, 207 (1939)
127. PFAFFMANN, C. Afferent impulses from the teeth re-
sulting from a vibratory stimulus
J. Physiol. 97, 220 (1939)
128. PFANZAGL, J. Allgemeine Methodenlehre der Sta-
tistik
de Gruyter Verl., Berlin (1972)
129. PICTON, D. C. A. Vertical movement of cheek teeth
during biting
Arch oral Biol., 8, 109 (1963)
130. PICTON, D. C. A. The effect of repeated thrusts on
normal axial tooth mobility
Arch oral Biol. 9, 55 (1964)

131. PÖLLMANN, L.
HILDEBRANDT, G.
SCHNELL, H. Über die tagesrhythmischen Veränderungen der Schmerzschwelle und des 'Dickenunterscheidungsvermögens' der Frontzähne
Dtsch. zahnärztl. Z. 29, 238 (1974)
DIMDI
132. PORT-EULER Lehrbuch der Zahnheilkunde, Kap. 3
Bergmann Verl., München (1929)
133. POSSELT, U. Physiology of occlusion and rehabilitation
Blackwell Scientific, Oxford (1973)
134. RAMFJORD, S. P. Bruxism: a clinical and electromyographic study
JADA 62, 21 (1961)
135. RANSJÖ, K.
THILANDER, B. Perception of mandibular position in cases of temporomandibular joint disorders
Odontol. Tidskrift 71, 134 (1963)
136. RAPP, R.
KIRSTINE, W. S.
AVERY, J. K. A study of neural endings in the human gingiva and periodontal membrane
J. Canad. Dent. Assoc, 23, 637 (1957)
137. RASCH, C. Über die Lokalisation von Druckempfindungen, die von menschlichen Zähnen ausgelöst werden
Med. Diss., Berlin (1951)
138. RATEITSCHAK, K. H.
RENGGLI, H. H.
MÜHLEMANN, H. R. Parodontologie
Thieme-Verl., Stuttgart (1978²)
139. REIN, H.
SCHNEIDER, M. Einführung in die Physiologie des Menschen
Springer-Verl., Berlin (1973¹⁶)
140. RIIS, D.
GIDDON, D. B. Interdental discrimination of small thickness differences
J. Pros. Dent. 24, 324 (1970)
141. SACHS, L. Statistische Methoden
Springer-Verl., Berlin (1972)

142. SCHAERER, P.
STALLARD, R. E.
ZANDER, H. A. Occlusal interferences and mastication: an electromyographic study
J. Pros. Dent. 17, 438 (1967)
143. SCHMIDT, R. F. Grundriß der Neurophysiologie
Springer-Verl., Berlin (1972²)
144. SCHMIDT, R. F. Grundriß der Sinnesphysiologie
Springer-Verl., Berlin (1973)
145. SCHOUR, I. The periodontal ligament; in:
Noyes' oral histology and embryology;
Hrsg.: I. Schour
Lea & Febiger, Philadelphia (1960⁸)
146. SCHROEDER, H. E. Orale Strukturbiologie
Thieme-Verl., Stuttgart (1976)
147. SCHULTE, W. Knirschen und Pressen im vollbezahnten Gebiß - zugleich ein Beitrag zur Therapie der parafunktionell bedingten Kiefergelenkserkrankungen und zur Messung der Kaumuskel-tätigkeit
Dtsch. zahnärztl. Z. 21, 112 (1966)
148. SCHUMACHER, G. H. Anatomie und Physiologie des Parodontiums
Dtsch. Stomatologie 12, 305 (1962)
149. SCHWEITZER, G. Über die Lymphgefäße des Zahnfleisches und der Zähne beim Menschen und bei Säugetieren
Archiv f. mikroskop. Anatom. 69, 807 (1907)
150. SCOTT, D.
SHROFF, F. R.
GABEL, A. B. Response pattern of sensory endings in the tooth of the cat
Federation Proc. 12, 129 (1953)
151. SESSLE, B. J.
SCHMITT, A.
YU, S.-K. J.
GREENWOOD, L. F. Influence of mechanical stimulation of teeth on cat trigeminal motoneurons
IADR Abstr. (1973)
152. SIEBERT, G. Zur physiologischen Auslenkung der Zähne
Dtsch. zahnärztl. Z. 35, 362 (1980)

153. SIEGEL, S. Nichtparametrische statistische Methoden
Fachbuchhandl. f. Psychol., Frankfurt (1976)
154. SIGMUND Die Empfindungen der Zähne
Dtsch. Vierteljahresschr. f. ZHK (1867)
155. SIIRILÄ, H. S. The tactile sensibility of the parodontium to slight axial loadings of the teeth
LAINÉ, P. Acta odont. scand. 20, 415 (1963)
156. SIIRILÄ, H. S. Sensory thresholds in discriminating differences in thickness between the teeth, by different degrees of mouth opening
LAINÉ, P. Proc. Finn. Dent. Soc. 68, 134 (1972)
157. SIMPSON, H. E. The innervation of the periodontal membrane as observed by the apoxestic technique
J. of Periodontology 37, 374 (1966)
158. SKRAMLIK, E. v. Die sinnlichen Erlebnisse nach Entfernung bzw. nach Ersatz von Zähnen
Dtsch. Zahn-, Mund u. Kieferheilk. 13, 37 (1950)
159. SKRAMLIK, E. v. Die Zähne als Vermittler von Empfindungen
Dtsch. Stomat. 2, 326 (1952)
160. SPRENKEL, H. B. van Microscopical investigation of the innervation of the tooth and its surroundings
der J. of Anatomy 70, 233 (1935/6)
161. STARKE, R. Über die Unterscheidung von zwei Druckreizarten auf normalen Zähnen
Med. Diss., Berlin (1952)
162. STEENBERGHE, D. van The role and function of periodontal neural receptors in man
Habil. Schrift., Leuven (1979)
163. STEINER, J. Über das Empfindungsvermögen der Zähne des Menschen
Centralbl. f. Physiol. 15, 585 (1902)

164. STEWART, D. Some aspects of the innervation of the teeth
Proc. of the Royal Soc. of Med. 20, 1675 (1927)
165. STÖSSEL, J.-P. Arbeiten, wenn andere schlafen. Schichtarbeit macht krank
Bild d. Wissensch. 3, 122 (1980)
166. STOREY, A. T. Sensory functions of the temporo-mandibular joint
J. Canad. Dent. Ass. 34, 294 (1968)
167. SUZUKI, H. Responses of the mechanoreceptors in the periodontal membrane to vibratory stimulus on the canine of the cat
J. Physiol. Soc. Japan 25, 415 (1963)
168. THEIL, E. Bis zu welchem Grade kann die Tastfähigkeit der menschlichen Zahnreihenglieder festgestellt werden?
Dtsch. Monatsschr. f. Zahnheilk. 49, 270 (1931)
169. THILANDER, B. Innervation of the temporo-mandibular joint capsule in man
Almqvist & Wiksells, Uppsala (1961)
170. TRYDE, G.
 FRYDENBERG, O.
 BRILL, N. An assessment of the tactile sensibility in human teeth
Acta Odont. Scand. 20, 233 (1962)
171. TÜRKHEIM, H. Die Sinnesphysiologie der Mundhöhle und der Zähne
Dtsch. Zahnheilk. 52, 5 (1921)
172. VOSS, H.
 HERRLINGER, R. Taschenbuch der Anatomie
Fischer-Verl., Stuttgart (1968¹³)
173. WAGERS, P. W.
 SMITH, C. M. Responses in dental nerves of dogs to tooth stimulation and the effects of systemically administered procaine, lidocaine and morphine
J. of Pharmacol. and Therapeutics 130, 8394 (1960)
174. WEILL, R.
 BENSADOUN, R.
 TOURNIEL, F. de Démonstration autoradiographique de l'innervation de la dent et du parodonte
C. R. Acad. Sc. Paris t. 281, D., 647 (1975)

175. WILKIE, J. K. Preliminary observations on pressor sensory thresholds of anterior teeth
J. dent. Res. 43, Suppl. 5, 962 (1964)
176. WILLIAMS, W. N. Relationships among oral form recognition, interdental thickness discrimination and interdental weight discrimination
LaPOINTE, L. L. Perceptual and Motor Skills 35, 191 (1972)
177. WILLIAMS, N. Interdental thickness discrimination by normal subjects
LaPOINTE, L. L. J. Dent. Res. 53, 1404 (1974)
THORNBY, J. I.
178. YAMADA, M. Interactions between the tactile sense and the mobility of the tooth
J. dent. Res. 46, 1256 (1967)
179. YAMADA, M. Mobility and assessment of the tactile sensation of teeth
KUMANO, T. Int. Dent. J. 19, 295 (1969)
DIMDI
180. YAMADA, M. Physiologic studies on the mechanoreceptors of the periodontal membrane
SAKADA, S. Int. Ass. f. dental Res. 40, 225
MURATA, Y. (1959)
UEYAMA, M.

Danksagung

Herrn Prof. Dr. L. Hupfauf danke ich für die Überlassung des Themas sowie für seine unbürokratische und sehr großzügige Unterstützung bei der Erstellung der Arbeit.

Für die Mithilfe bei der Auswahl der Prüfkörper danke ich Herrn Dr. K. Detzer, Herrn K. Fricke (Fa. Gebr. Brasseler), Herrn Dr. Mertler, Herrn OA Dr. V. Stachniss, Herrn Dr. v. Wedel, Herrn Dr. Weidenberg (Fa. Siemens) und der Fa. Dynamit Nobel AG.

Gedanken von Dr. H. Engelhardt, Dr. A. Malchau, K. Oettershagen und U. Wegmann haben den Aufbau der Untersuchungsmethodik beeinflusst.

Die Bibliothekarin der Universitätszahnklinik, Frau Horn, leistete mir bei der Bestellung der Literatur gute Dienste.

Meiner Frau danke ich für die geduldige Durchführung der Schreibarbeiten.

Im besonderen möchte ich allen Probanden für ihren teilweise erheblichen Einsatz herzlich danken.